

**VŠB – Technická Univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra energetiky**

**Nový jaderný zdroj v JE Temelín**

**New Nuclear Unit at NPP Temelín**

**Student:**

**Josef Ležák**

**Vedoucí bakalářské práce:**

**prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

**Ostrava 2020**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Josef Ležák**

Studijní program:

B3907 Energetika

Studijní obor:

3907R012 Energetika 21.století

Téma:

Nový jaderný zdroj v JE Temelín  
New Nuclear Unit at NPP Temelín

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Proveďte analýzu jaderných zdrojů vhodných pro dostavbu jaderné elektrárny Temelín. Popište I. a II. okruh, pasivní a aktivní bezpečnostní systémy a proveďte jejich technickou a bezpečnostní analýzu. Ve výpočtové části se zaměřte na tepelný výpočet horizontálního trubkového výměníku tepla voda-pára ve čtyř-smyčkovém uspořádání I. okruhu s tepelným výkonem 800 MW, parním výkonem 1600 t/h, tlak páry v II. okruhu je 7 MPa a teplota napájecí vody min. 220 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.

Mátal, O.: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.

Hezoučský, F.: *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

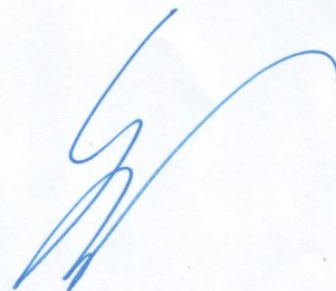
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....17.5.2020.....

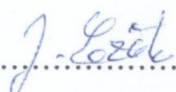
..........  
podpis studenta



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školního představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO v případě zájmu z její strany uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu užití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....17.5.2020

.....  
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:      Josef Ležák

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LEŽÁK J. *Nový jaderný zdroj v JE Temelín, bakalářská práce*. VŠB – Technická univerzita, Katedra energetiky 2020, 83 s

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Tato bakalářská práce se věnuje popisu a porovnání dvou z několika vhodných projektů, prostřednictvím kterých by v budoucnu bylo možné realizovat výstavbu nových bloků v jaderné elektrárně Temelín. V práci jsou kromě jaderných reaktorů popsány části primárních a sekundárních okruhů, pozornost je také zaměřena na bezpečnostní systémy. Práce má na zřeteli pouze technická a bezpečnostní, nikoliv ekonomická a geopolitická hlediska. Součástí práce je tepelný výpočet výměníku.

Klíčová slova: Temelín, APR-1400, VVER-1000, VVER-1200, výměník

## ANOTATION OF BACHELOR THESIS

This bachelor's thesis deals with the description and comparison of two of the several suitable projects that could be used in the future for the construction of new units of the Temelín Nuclear Power Station. Besides nuclear reactors, the paper describes parts of primary and secondary circuits and it focuses on safety systems as well. The work takes into account only technical and security aspects, not economic and geopolitical aspects. The paper also contains a thermal calculation of an exchanger.

Keywords: Temelín, APR-1400, VVER-1000, VVER-1200, exchanger

|  |    |
|--|----|
| Úvod.....  | 1  |
| 1. Státní energetická koncepce .....   | 2  |
| 1.1 Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky .....                                    | 2  |
| 1.2 Jaderné zdroje generace III+ .....   | 3  |
| 1.2.1 Požadavky kladené na jaderné zdroje generace III+ .....                              | 4  |
| 2. Jaderná elektrárna Temelín.....   | 5  |
| 2.1 Důvody pro rozšíření JE Temelín o další dva bloky .....                                | 5  |
| 2.2 JE Temelín – popis základních částí .....  | 8  |
| 2.2.1 Části primárního okruhu .....  | 8  |
| 2.2.1.1 Reaktor VVER-1000 .....  | 9  |
| 2.2.1.2 Hlavní cirkulační čerpadla .....   | 9  |
| 2.2.1.3 Parogenerátory .....   | 9  |
| 2.2.1.4 Kompenzátor objemu .....   | 10 |
| 2.2.2 Části sekundárního a terciálního okruhu .....  | 10 |
| 2.2.2.1 Turbosoustrojí .....   | 10 |
| 2.2.2.2 Kondenzátor a chladicí okruh .....   | 10 |
| 2.3 JE Temelín-bezpečnostní systémy .....  | 11 |
| 2.3.1 Aktivní bezpečnostní systémy, třikrát plně zálohované .....                          | 11 |
| 2.3.2 Pasivní bezpečnostní systémy .....   | 12 |
| 2.4 Maximální projektová havárie JE Temelín .....  | 12 |
| 3. APR-1400 .....  | 14 |
| 3.1 Primární okruh .....   | 16 |
| 3.2 Reaktor .....  | 17 |
| 3.3 Hlavní cirkulační čerpadlo .....   | 20 |
| 3.4 Parogenerátor .....  | 22 |
| 3.5 Kompenzátor objemu .....   | 23 |
| 3.6 Bezpečnostní systémy APR-1400 .....  | 25 |
| 3.6.1 Systém havarijního chlazení aktivní zóny SIS .....                                   | 26 |
| 3.6.2 Pomocný napájecí systém - AFWS .....   | 27 |
| 3.6.3 Systém chlazení po odstavení reaktoru-SCS .....                                      | 28 |
| 3.6.4 Zaplavení prostor pod reaktorem a chlazení pláště reaktoru vodou IVR-<br>ERVCS ..... | 28 |
| 3.6.5 Zaplavení prostor pod reaktorem vodou – CFS .....                                    | 29 |
| 3.6.6 Sprchový systém kontejnmentu - CSS.....  | 29 |
| 3.6.7 Nouzový záložní sprchový systém - ECSBS.....   | 30 |
| 3.6.8 Akumulační nádrž na vodu k výměně paliva uvnitř kontejnmentu-IRWST .....             | 30 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 3.6.9    | Systém odstraňování vodíku - HMS .....                           | 30 |
| 3.6.10   | Pasivní pomocný napájecí systém – PAFS .....                     | 31 |
| 3.6.11   | Přetlaková ochrana primárního okruhu .....                       | 32 |
| 3.6.11.1 | Systém odplynění a odtlakování primárního okruhu SDVS .....      | 32 |
| 3.6.12   | Přetlaková ochrana sekundárního okruhu .....                     | 32 |
| 3.6.13   | Kontejnment .....  | 33 |
| 4.       | VVER-1200 .....  | 34 |
| 4.1      | Primární okruh .....   | 38 |
| 4.1.1    | Reaktor .....  | 39 |
| 4.1.2    | Hlavní cirkulační čerpadlo .....                                 | 42 |
| 4.1.3    | Parogenerátor .....  | 43 |
| 4.1.4    | Kompenzátor objemu .....   | 46 |
| 4.2      | Sekundární okruh .....   | 47 |
| 4.2.1    | Turbína LMZ K-1200-6,8 / 50 s alternátorem TZW-1200 -2UZ .....   | 47 |
| 4.2.2    | Turbína ARABELLE-1000 .....                                      | 47 |
| 4.3      | Bezpečnostní systémy VVER-1200 .....                             | 49 |
| 4.3.1    | Systémy havarijního chlazení aktivní zóny .....                  | 50 |
| 4.3.1.1  | Aktivní část systémů havarijního chlazení .....                  | 50 |
| 4.3.1.2  | Pasivní část systémů havarijního chlazení .....                  | 51 |
| 4.3.2    | Havarijní vstřikování bóru .....                                 | 53 |
| 4.3.3    | Dodávka havarijní napájecí vody .....                            | 53 |
| 4.3.4    | Nouzové chlazení parogenerátoru .....                            | 54 |
| 4.3.5    | Nouzový odvod plynů .....  | 54 |
| 4.3.6    | Systémy pasivního odvodu tepla z obálky a z parogenerátoru ..... | 55 |
| 4.3.6.1  | SPOT .....   | 55 |
| 4.3.6.2  | SPOT-PG a SPOT-ZO .....  | 56 |
| 4.3.7    | Lapač koria .....  | 57 |
| 4.3.8    | Systém odstraňování vodíku .....                                 | 59 |
| 4.3.9    | Kontejnment .....  | 60 |
| 5.       | Výpočtová část .....   | 61 |
|          | Závěr .....  | 73 |
|          | LITERATURA .....   | 78 |
|          | Seznam obrázků .....   | 82 |
|          | Seznam tabulek .....   | 83 |

## Seznam použitých veličin

| Značka           | Veličina   | Jednotka                            |
|------------------|--|-------------------------------------|
| $P$              | Tlak   | [MPa]                               |
| $G$              | Parní výkon výměníku   | [kg · s <sup>-1</sup> ]             |
| $Q$              | Tepelný výkon výměníku   | [kW]                                |
| $d$              | Vnitřní průměr trubky  | [mm]                                |
| $D$              | Vnější průměr trubky   | [mm]                                |
| $t_{s,st}$       | Střední teplota stěny trubky   | [°C]                                |
| $t_{v,st}$       | Střední teplota média v primárním okruhu   | [°C]                                |
| $t_1'$           | Teplota primárního média vstupujícího do výměníku  | [°C]                                |
| $t_1''$          | Teplota primárního média vystupujícího z výměníku  | [°C]                                |
| $t_2'$           | Teplota syté páry při zadaném výstupním tlaku 7MPa                                       | [°C]                                |
| $t_2''$          | Teplota napájecí vody  | [°C]                                |
| $\Delta t'$      | Teplotní rozdíl mezi vstupujícím primárním a vystupujícím sekundárním médiem z výměníku  | [°C]                                |
| $\Delta t''$     | Teplotní rozdíl mezi vystupujícím primárním a vstupujícím sekundárním médiem do výměníku | [°C]                                |
| $\Delta t_{log}$ | Střední logaritmický teplotní spád   | [°C]                                |
| $\dot{m}_v$      | Hmotnostní průtok primárního média výměníkem   | [kg · s <sup>-1</sup> ]             |
| $\dot{V}$        | Objemový průtok  | [m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ] |
| $Nu$             | Nusseltovo kritérium   | [-]                                 |
| $Pr$             | Prandtlovo číslo   | [-]                                 |
| $Pr_{st}$        | Prandtlovo číslo při střední teplotě stěny trubky  | [-]                                 |
| $Re$             | Reynoldsovo kritérium  | [-]                                 |
| $S$              | Teplosměnná plocha   | [m <sup>2</sup> ]                   |
| $S_{p,sk}$       | Skutečná průtočná plocha výměníku  | [m <sup>2</sup> ]                   |
| $S_{p,t}$        | Celková teoretická průtočná plocha výměníku  | [m <sup>2</sup> ]                   |
| $S_{1tr}$        | Průtočná plocha pro jednu trubku   | [m <sup>2</sup> ]                   |
| $i_{nv}$         | Entalpie napájecí vody   | [kJ · kg <sup>-1</sup> ]            |
| $i_{sk}$         | Entalpie syté kapaliny   | [kJ · kg <sup>-1</sup> ]            |
| $i_{sp}$         | Entalpie syté páry   | [kJ · kg <sup>-1</sup> ]            |
| $i_{vyp}$        | Výparné teplo vody   | [kJ · kg <sup>-1</sup> ]            |
| $A$              | Výpočtová konstanta  | [-]                                 |
| $l$              | Celková délka trubek výměníku  | [m]                                 |



|                |   |  |
|----------------|---|--|
| $l_{stř}$      | Střední délka trubky  | [m]                                    |
| $n_{tr,t}$     | Teoretický počet trubek ve výměníku                                     | [-]                                    |
| $n_{tr,sk}$    | Skutečný počet trubek ve výměníku                                       | [-]                                    |
| $q$            | Střední tepelný tok stěnou trubky                                       | [W.m <sup>-2</sup> ]                   |
| $k$            | Součinitel prostupu tepla mezi primárním a sekundárním médiem           | [W.m <sup>2</sup> .K <sup>-1</sup> ]   |
| $w$            | Odhadovaná průměrná rychlost proudění primárního média trubkou výměníku | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $w_{sk}$       | Skutečná průměrná rychlost proudění primárního média trubkou výměníku   | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $\alpha_1$     | Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a vnitřní stěnou trubky | [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $\alpha_2$     | Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a parovodní směsí   | [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $\eta$         | Dynamická viskozita   | [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ] |
| $\lambda_v$    | Součinitel tepelné vodivosti primárního média                           | [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $\lambda_{st}$ | Součinitel tepelné vodivosti stěny                                      | [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $\nu$          | Kinematická viskozita   | [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]     |
| $\rho$         | Hustota   | [kg.m <sup>-3</sup> ]                  |

| <b>Seznam použitých zkratk</b> |   |
|--------------------------------|---|
| SIS                            | (Safety Injection System) – systém havarijního chlazení aktivní zóny  |
| AFWS                           | (Auxiliary Feed Water System) – pomocný napájecí systém   |
| SCS                            | (Shutdown Cooling System) – systém chlazení po odstavení reaktoru   |
| IVR – ERVCS                    | (In-vessel Retention-External Reactor Vessel Cooling System) – zaplavení dolní části reaktorové nádoby vodou – aktivní systém |
| CFS                            | (Cavity Flooding System) – zaplavení prostor pod reaktorem vodou – pasivní systém   |
| CSS                            | (Containment Spray System) – sprchový systém kontejnmentu   |
| ECSBS                          | (Emergency Containment Spray Backup System) – nouzový záložní sprchový systém   |
| IRWST                          | (In-containment Refueling Water Storage Tank) – prstencová akumulární nádrž v kontejnmentu                                    |
| HMS                            | (Hydrogen Mitigation System) – systém odstraňování vodíku   |
| PAFS                           | (Passive Aux Feedwater System) – pasivní pomocný napájecí systém  |
| SDVS                           | (Safety Depressurization and Vent System) – ventilační a odtlakovací systém   |
| DVI                            | (Direct Vessel Injection) – přímý vstřik chladicí vody do reaktoru  |
| FD                             | (Fluidic Device) – zařízení omezující průtok  |
| SIP                            | (Safety Injection Pump) – vysokotlaké čerpadlo  |
| SIT                            | (Safety Injection Tank) – akumulární zásobníky  |
| HVT                            | (Holdup Volume Tank) – zadržovací nádrž   |
| POSRV                          | (Pilot Operated Safety and Relief Valve) – pojistné a přetlakové ventily  |
| AFWT                           | (Auxiliary Feed Water Tank) -nádrž k napájení systémů AFWS a PAFS   |
| PAFT                           | (Passive Aux Feedwater Tank) – nádrž k napájení systému PAFS  |
| PAR                            | (Passive Auto-catalytic Recombiners) – autokatalytické rekombinátory  |
| RDT                            | (Rapid Depressurization Tank) – nádrž rychlého odplynění  |

## Úvod

Česká energetika od počátku nového tisíciletí prošla a i nyní stále prochází výraznými změnami. Vznikl energetický regulační úřad, byla zprovozněna elektrárna Temelín, došlo k uvolnění trhu s elektrickou energií a zemním plynem, byly prolomeny limity pro těžbu uhlí, ale také ukončena těžba uranu.

Množství vyrobené elektrické energie z uhlí je za poslední léta poměrně stabilní, ale zřejmě bude v budoucnu tlumeno. Není to dáno pouze legitimními ekologickými požadavky. Vzhledem k tomu, že mnoho tepelných elektráren se blíží k hranici své životnosti, je proměna českého energetického mixu nejen z tohoto pohledu zřejmě nevyhnutelná. Jsme zemí, kde elektrickou energii vyrábíme téměř z padesáti procent spalováním uhlí. Vyrůstají požadavky na procentuální zastoupení obnovitelných zdrojů v našem energetickém mixu. V kombinaci s narůstající spotřebou elektrické energie a stabilitou elektrické přenosové soustavy vyvstává mnoho otázek, na něž není snadné odpovědět. Učiněná rozhodnutí, jak tyto otázky řešit, však budou mít v příštích desetiletích mnohé důsledky. Správným krokem na cestě k uhlíkové neutralitě a energetické nezávislosti by se kromě podpory obnovitelných zdrojů zřejmě mohla stát, a v našich geografických podmínkách i měla, větší podpora jaderné energetiky.

Výstavba nových jaderných bloků, ať už v nedostavěném Temelíně, případně Dukovanech, s sebou přinese spoustu příležitostí pro České dodavatelské firmy, příležitost ukázat schopnosti našeho průmyslu. Vždyť jsme zemí, která v oblasti výstavby a provozování jaderných zdrojů není bez zkušeností. Ano, změnila se situace a podmínky. Nicméně se sluší připomenout, že čtyři dukovanské bloky postavené za pouhých devět let, byly z osmdesáti procent vybaveny zařízením vyrobeným v tehdejší Československu.

Je v současnosti vůbec vhodné začít se stavbou velkých, léty prověřených energetických zdrojů, nebo je lepší takticky čekat na malé modulární reaktory?

### **Cíle práce:**

- Popsat po technické stránce a zasadit do souvislostí bloky JE Temelín.
- Popsat po technické stránce blok APR-1400, jakožto jednoho z několika možných kandidátů pro dostavbu Temelína.
- Popsat po technické stránce blok VVER-1200, jakožto jednoho z několika možných kandidátů pro dostavbu Temelína.
- Ve výpočtové části provést tepelný výpočet výměníku ve čtyřsmýčkovém uspořádání primárního okruhu.
- Porovnat konstrukci obou bloků s ohledem na bezpečnost.

## **1. Státní energetická koncepce**

Státní energetická koncepce je strategickým dokumentem, který vyjadřuje cíle v energetickém hospodářství. Současná energetická koncepce byla vládou schválena v květnu 2015 a byla přijata na dobu pětadvaceti let, přičemž v pětiletých intervalech se předpokládá její pravidelné vyhodnocování.

Vrcholovými strategickými cíli za běžných podmínek jsou:

- bezpečná a spolehlivá dodávka energií spotřebitelům i při skokové změně vnějších podmínek, a to v odpovídající kvalitě
- dodávka energií za sociálně přijatelné ceny ve srovnání s okolními zeměmi a zároveň schopnost energetických podniků vytvářet zisk
- udržitelnost z pohledu dopadů na životní prostředí i finančně ekonomického, udržitelnost z hlediska lidských zdrojů, sociálních dopadů a dostupnosti primárních zdrojů
- v krizových situacích musí být zabezpečeny nepřerušované dodávky energie v takovém rozsahu, aby mohly fungovat nejdůležitější složky států a přežilo obyvatelstvo

### **1.1 Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky**

Jedná se o plán vycházející ze státní energetické koncepce, který byl vládou schválen v červnu 2015 a který je pro výkon státní správy závazný.

Národní akční plán vychází z následujících tezí:

- ze strategických cílů státní energetické koncepce vyplývá snaha o udržení energetické bezpečnosti na základě využívání vlastních zdrojů elektrické energie.
- z výsledků analýzy rizik vyplývá, že po roce 2025 a hlavně po roce 2035 hrozí velké riziko nedostatku elektrické energie za předpokladu, že neproběhne výstavba nových zdrojů.
- samotné obnovitelné zdroje nemohou z hlediska výroby elektrické energie zajistit České republice soběstačnost. [3,4]

Spotřeba primárních energetických zdrojů je v ČR pokryta z téměř 50 % domácími zdroji. Energetická závislost ČR je tedy jednou z nejnižších v rámci EU. V české energetice současnosti dominují uhelné zdroje, které dodávají kolem 50 % elektrické energie. Rozhodující část těchto výrobních zdrojů elektrické energie se blíží k hranici své životnosti a v budoucnu bude podíl uhelných zdrojů klesat.

Státní energetická koncepce i národní akční plán tedy hledají řešení, jak pokles výroby elektrické energie z uhlí kompenzovat.

#### Mezi východiska patří:

- posílit jadernou energetiku v energetickém mixu naší republiky tak, že do roku 2040 bude zvýšen podíl z celkové výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách na 50 %.
- urychlit přípravu výstavby nových jaderných zdrojů na již existujících lokalitách s ohledem na to, že v letech 2035-2037 může dojít k ukončení výroby elektrické energie v jaderné elektrárně Dukovany. Lokality Dukovan a Temelína jsou v současnosti jediné oblasti, ve kterých je v rámci České republiky výstavba nových jaderných zdrojů možná.

Národní akční plán předpokládá, že k výběru dodavatele nového jaderného zdroje, nebo zdrojů dojde v letech 2022 až 2023. Národní akční plán také předpokládá, že v závislosti na poptávce po elektrické energii by po roce 2025 mohla být zahájena výstavba jednoho až čtyř bloků. Pokud by vše probíhalo dle zpracovaného harmonogramu, spuštění prvního bloku nového jaderného zdroje by mohlo být realizováno mezi lety 2035 až 2040. [4]

## **1.2 Jaderné zdroje generace III+**

Pokud vycházíme z předpokladu, že nejdůležitějším kritériem pro výběr potencionálního dodavatele a použité technologie je bezpečnost, měl by nový blok nebo bloky spadat do generace III+. Z tohoto hlediska se nám v současnosti nabízí možnosti dle tab. 1.1.

Pro výběr nejvhodnější varianty jaderného zdroje nebo zdrojů je samozřejmě nutné jednotlivé projekty posoudit odborníky nejen z technického, bezpečnostního, ekonomického či geopolitického hlediska. Je třeba také zohlednit, jaký celkový tepelný výkon bloků lze v dané lokalitě uchladiť. [3,4]

| <b>Dodavatel</b>   | <b>Technologie</b>   |
|--|----------------------|
| <b>CNNC+ China General Nuclear Power Corporation (CGN)</b> | HPR-1000             |
| <b>EDF</b>   | EPR                  |
| <b>EDF+ Mitsubishi Heavy Industries</b>                    | ATMEA 1              |
| <b>KHNP + KEPCO</b>  | APR-1400<br>APR-1000 |
| <b>Rosatom</b>   | MIR-1200             |
| <b>Westinghouse</b>  | AP-1000              |

*Tabulka 1.1: Potenciální dodavatelé bloků generace III+ [31]*

### 1.2.1 Požadavky kladené na jaderné zdroje generace III+

- Reaktory generace III+ jsou dalším evolučním stupněm, kdy jsou reaktory vylepšovány tak, aby splňovaly nové bezpečnostní požadavky, a jsou zde zohledněny zkušenosti s provozem a výstavbou bloků III. generace. V projektech generace III+ jsou také zohledněny závěry analýzy havárie jaderné elektrárny Fukušima. Výsledkem těchto vylepšení je větší odolnost vůči záplavám a zemětřesením. Je zde výrazně zmenšen prostor pro chyby obsluhy. V případě krizových situací systémy fungují automaticky a není zde zapotřebí zásahu operátora. Systémy musí zajistit bezpečný provoz po dobu 72 hodin v případě nouzového stavu, a to bez zásahu obsluhy. Ve větší míře jsou zde využívány pasivní bezpečnostní prvky fungující například na bázi přirozeného proudění či gravitace. Je požadován buď dvojité, nebo vylepšený kontejnment, který odolá i pádu dopravního letadla.
- U projektů generace III+ je požadována možnost provozovat reaktor s částečnou vsázkou paliva MOX, které vzniká přepracováním vyhořelého paliva a je tudíž cenově dostupnější, protože je není třeba obohacovat uranem  $^{235}\text{U}$ . V těchto projektech jsou také zapracovávány nové možnosti, jak nakládat s radioaktivním odpadem a vyhořelým palivem.
- U těchto projektů je též kladen důraz na ekonomickou stránku, ať už z hlediska délky projektování a výstavby jaderných bloků, nebo následných nákladů na jejich provoz a údržbu. Je zde snaha o zjednodušení, standardizaci a využití modulárních konstrukcí. [1,6]



## **2. Jaderná elektrárna Temelín**

Jaderná elektrárna Temelín je jaderným zdrojem II. generace, jejíž výstavba započala v roce 1985. Do provozu byla uvedena v roce 2000 a dokončena byla v roce 2002. Elektrárna se nachází nedaleko obce Týn nad Vltavou. Elektrická energie je zde vyráběna ve 2 blocích osazenými tlakovodními reaktory VVER-1000 typu V-320. Instalovaný výkon turbogenerátorů činí 2 x 1125 MWe.

Elektrárna se rozprostírá na ploše 143 ha, a jako taková byla v roce 1985 projektována pro čtyři bloky, s projektovou životností hlavních částí elektrárny 30 let. Po listopadu 1989 však bylo rozhodnuto dva bloky zakonzervovat ve stádiu, kdy byly dokončeny zemní práce. Znamená to tedy, že v temelínském areálu je na případnou dostavbu vše připraveno.

Oblast pro výstavbu elektrárny byla v roce 1980 vybrána na základě mnoha technických bezpečnostních a ekonomických hledisek:

- Výběr lokality pro výstavbu jaderné elektrárny Temelín byl proveden tak, aby se minimalizovaly interakce s okolím. Na výstavbu jaderných elektráren jsou kladeny nadstandartní geologické hydrologické a meteorologické požadavky. Oblast, ve které je elektrárna postavená, je geologicky stabilní a seizmicky klidná.
- Vzhledem k dostatečné nadmořské výšce není elektrárna ohrožena povodněmi.
- Umístění elektrárny do jižních Čech je ekonomicky výhodné z hlediska přenosové soustavy, kdy tepelné elektrárny jsou naopak na severu poblíž ložisek uhlí.
- Z hlediska bezpečnosti je výhodná nižší hustota zalidnění dané oblasti.

### **2.1 Důvody pro rozšíření JE Temelín o další dva bloky**

- Lokalita je vybavena nezbytnou infrastrukturou pro 4 bloky, se kterými se počítalo už v projektu.
- Doprava nadrozměrných a těžkých zařízení do dané lokality je proveditelná a ekonomická. Ze studií vyplývá, že nejvhodnější variantou dopravy by byla kombinace vodní a silniční přepravy, kdy náklad z lodi by byl vyložen v Týně nad Vltavou.
- V lokalitě lze bez omezení umístit 2 bloky s výkonem 1000 až 1700 MW.

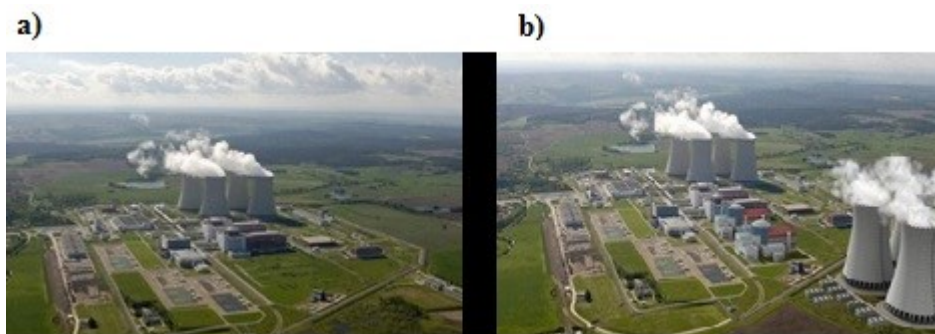
Oblast je v blízkosti řeky Vltavy, a spolu s vodním dílem Hněvkovice na Vltavě je zajištěn dostatek technologické vody pro chlazení. Ze studií k roku 2085 vyplývá,

že pro všechny varianty rozšíření výkonu jaderné elektrárny až na 3400 MW bude voda dostupná. [2,7]

| <b>ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY BLOKU JADERNÉ ELEKTRÁRNY TEMELÍN</b> |                           |   |                          |
|--|---------------------------|---|--------------------------|
| <b>Typ reaktoru</b>  |                           | <b>Parní turbína 1 000 MW</b>                     |                          |
| Heterogenní, tlakovodní energetický reaktor VVER 1000                | Typ V320                  | Počet VT dílů                                     | 1                        |
| Nominální tepelný výkon  | 3120 MWt                  | Počet NT dílů                                     | 3                        |
| <b>Technické parametry reaktoru</b>                                  |                           | Nominální otáčky                                  | 3000 ot./min.            |
| Vnější průměr tlakové nádoby   | 4,5 m                     | Průtok páry při 100% výkonu v kondenzátním režimu | 5262,9 t/h               |
| Celková síla stěny válcové části nádoby                              | 200 mm                    | <b>Kondenzátor</b>                                |                          |
| Tloušťka výstelky z austenitické oceli                               | 7 mm                      | Počet na jednu turbínu                            | 3                        |
| Výška horního bloku  | 8,2 m                     | Počet trubek v jednom kondenzátoru                | 31 900                   |
| Celková výška horního bloku  | 19,1 m                    | Teplosměnná plocha                                | 23 200 m <sup>2</sup>    |
| Celková hmotnost   | cca 800 t                 | Teplota chladicí vody max.                        | 34 °C                    |
| <b>Aktivní zóna reaktoru</b>   |                           | Množství chladicí vody                            | 36 500 m <sup>3</sup> /h |
| Počet palivových kazet   | 163                       | Délka trubek                                      | 12 m                     |
| Počet palivových proutků v kazetě                                    | 312                       | <b>Alternátor</b>                                 |                          |
| Počet řídicích a regulačních svazků                                  | 61                        | Nominální zdánlivý výkon                          | 1250 MVA                 |
| Počet absorpčních elementů jednoho svazku                            | 18                        | Dodávaný výkon do elektrické sítě                 | 1028 MW                  |
| Výška aktivní zóny   | 3,53 m                    | Vlastní spotřeba bloku                            | 54 MW                    |
| Průměr aktivní zóny  | 3,16 m                    | Nominální sdružené napětí                         | 24 kV                    |
| Obohacení paliva při první zarážce                                   | 1,3–3,8% <sup>235</sup> U | Nominální fázový proud                            | 26 726 A                 |
| Hmotnost palivové kazety   | 766 kg                    | Nominální frekvence                               | 50 Hz                    |
| Hmotnost paliva v jedné kazetě                                       | 563 kg                    | Chlazení  | vodík – voda             |
| Vsázka paliva  | 92 t                      | Hmotnost  | 564 t                    |

|   |                          |   |                          |
|---|--------------------------|---|--------------------------|
| Maximální vyhoření paliva                     | 60 MWd/kg                |   |                          |
| <b>Systém chlazení reaktoru</b>               |                          | <b>Chladicí věže</b>                          |                          |
| Počet chladicích smyček                       | 4                        | Výška věže                                    | 154,8 m                  |
| Pracovní tlak                                 | 15,7 MPa                 | Patní průměr                                  | 130,7 m                  |
| Teplota chladiva na vstupu do aktivní zóny    | 290 °C                   | Průměr v koruně věže                          | 82,6 m                   |
| Teplota na výstupu z aktivní zóny             | 320 °C                   | Tloušťka pláště tahového komína               | 0,9–0,18 m               |
| Průtok chladiva reaktorem                     | 84 600 m <sup>3</sup> /h | Celková plocha pláště                         | 81 000 m <sup>2</sup>    |
| Vnitřní průměr hlavního cirkulačního potrubí  | 850 mm                   | Objem sběrné nádrže                           | 35 000 m <sup>3</sup>    |
| Vnější průměr hlavního cirkulačního potrubí   | 995 mm                   | <b>Kontejnment</b>                            |                          |
| <b>Parogenerátor</b>                          |                          | Výška válcové části                           | 38 m                     |
| Počet na blok                                 | 4                        | Vnitřní průměr válcové části                  | 45 m                     |
| Vstupní/výstupní teplota na primární straně   | 320/290 °C               | Tloušťka stěny válcové části                  | 1,2 m                    |
| Vstupní/výstupní teplota na sekundární straně | 220/278,5 °C             | Tloušťka ocelové výstelky uvnitř kontejnmentu | 8 mm                     |
| Tlak  | 6,3 MPa                  | Maximální přetlak uvnitř                      | 0,49 MPa                 |
| Množství vyrobené páry                        | 1 470 t/h                | Maximální teplota uvnitř                      | 150 °C                   |
| Objem primární/sekundární strany              | 21/66 m <sup>3</sup>     | <b>Hlavní cirkulační čerpadlo</b>             |                          |
| Průměr tělesa parogenerátoru                  | 4,1 m                    | Počet na blok                                 | 4                        |
| Maximální délka tělesa parogenerátoru         | 14,8 m                   | Příkon čerpadla                               | 5,1 MW                   |
|   |                          | Provozní výkon                                | 21 200 m <sup>3</sup> /h |
|   |                          | Synchronní otáčky                             | 1 000 ot./min.           |
|   |                          | Hmotnost čerpadla                             | 156 t                    |

*Tabulka 2.1: Základní technické parametry jaderné elektrárny Temelín [1,10]*

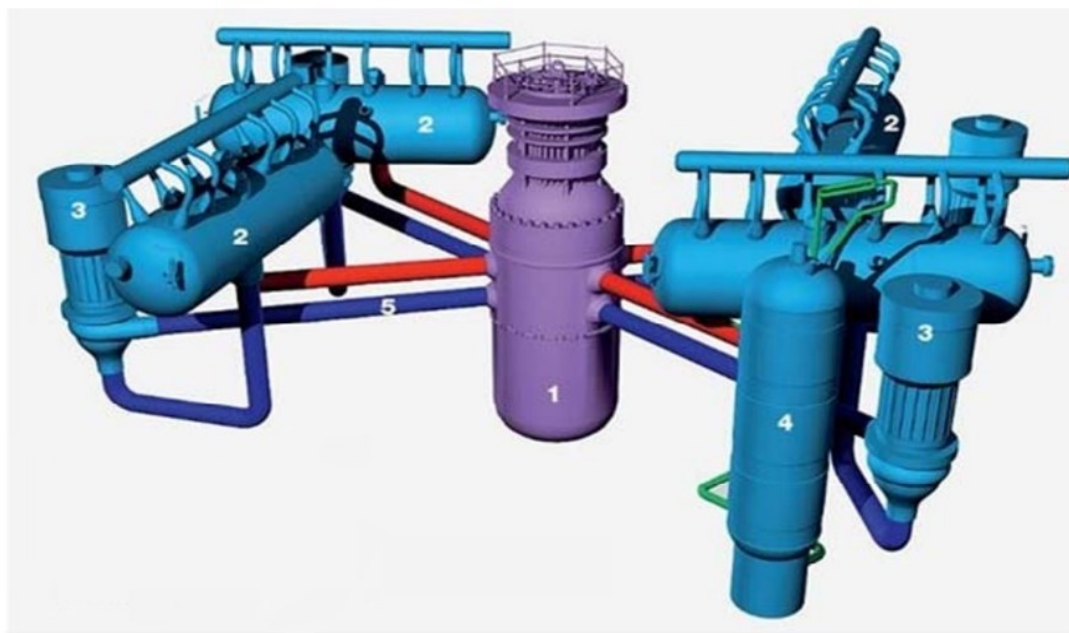


Obr. č. 2.1: a) JE Temelín před plánovanou dostavbou,  
b) Vizualizace možné dostavby JE Temelín [22]

## 2.2 JE Temelín – popis základních částí

### 2.2.1 Části primárního okruhu

Primární okruh je u bloků VVER-1000 ve čtyřsmyčkovém uspořádání. Primárnímu médiu je po průchodu aktivní zónou reaktoru předáno teplo štěpné reakce a následně je toto teplo v parogenerátorech předáváno sekundárnímu okruhu. Po průtoku primárního média parogenerátory je toto médium pomocí hlavních cirkulačních čerpadel přiváděno chladnými větvemi zpět do aktivní zóny reaktoru.



1. Jaderný reaktor      3. Hlavní cirkulační čerpadlo      5. Primární potrubí  
2. Parogenerátor      4. Kompenzátor objemu

Obr. č. 2.2: Části primárního okruhu JE Temelín [1]

### **2.2.1.1 Reaktor VVER-1000**

Hlavní částí reaktoru, který je srdcem jaderné elektrárny, je vertikálně uložená silnostěnná válcová nádoba vyrobená z nízkolegované oceli. Palivem je zde oxid uranický a je ve formě tablet vložen do palivových proutků. Palivo je obohaceno izotopem  $^{235}\text{U}$  na 3,1 % až 4,4 %. Z 312 palivových proutků jsou složeny palivové soubory, které jsou u ruských reaktorů hexagonálního tvaru. Reaktory západní konstrukce mají formu palivového souboru čtyřhrannou. Ve středu každého palivového souboru je měřicí trubka vybavená snímači. V aktivní zóně reaktoru je uloženo 163 palivových souborů rovněž v šestihranném uspořádání. V aktivní zóně je také rozmístěno 61 regulačních tyčí rozmístěných do 10 skupin, jejichž vertikálním posuvem je ovlivňována rychlost štěpné reakce. Chladícím médiem a zároveň moderátorem štěpné reakce je u primárního okruhu demineralizovaná voda s obsahem kyseliny borité. Její koncentrací je ovlivňována také rychlost štěpení a tím výkon reaktoru. Větším obsahem kyseliny borité v chladícím médiu se štěpná reakce tlumí.

### **2.2.1.2 Hlavní cirkulační čerpadla**

Jednou z klíčových součástí jaderných elektráren jsou cirkulační čerpadla zajišťující oběh primárního média a tím odvod tepla z aktivní zóny. Jsou vřazena ve studených větvích cirkulačních smyček mezi reaktor a parogenerátory. Jedná se o jednostupňová odstředivá čerpadla, kde je hřídel těsněna ucpávkou, čímž je eliminován únik primárního média mimo hlavní cirkulační okruh.

### **2.2.1.3 Parogenerátory**

Čtyři parogenerátory u bloků VVER-1000 jsou na rozdíl od parogenerátorů západních konstrukcí horizontálně uložené, rekuperační tepelné výměníky válcového tvaru. Jsou svařeny z legované konstrukční oceli. Teplosměnné trubky uvnitř výměníku jsou z nerezové oceli. Parogenerátory tvoří rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem elektrárny. Horká voda primárního okruhu zde přes teplosměnné plochy předává své teplo vodě sekundárního okruhu, která je po přeměně na páru vyvedená u každého bloku na jednu turbínu. Uvnitř parogenerátorů jsou vestavěna separační zařízení, proto je výstupem suchá sytá pára. [1,6,10]

#### **2.2.1.4 Kompenzátor objemu**

Součástí primárního okruhu je kompenzátor objemu, což je vertikálně situovaná, silnostěnná tlaková nádoba nerozebíratelně připojena na horkou větev jedné z cirkulačních smyček. Kompenzátor je určen ke stabilizaci tlaku v primárním okruhu. U bloků VVER-1000 je tlak stabilizován na úrovni  $15,6 \pm 0,3$  MPa. Při potřebě zvyšování tlaku je kompenzátor vybaven elektrickými topnými tělesy. Pokud je tlak v primárním okruhu třeba snížit, je kompenzátor vybaven sprchovým systémem. Při velkém nárustu tlaku, který nelze upravit sprchováním, jsou aktivovány pojistné ventily. Kompenzátor objemu plní důležitou funkci nejen v průběhu provozu, ale také při odstavování, nebo najíždění bloku. Před najetím bloku je tlak v primárním okruhu vytvářen tlakem dusíku v kompenzátoru. Po najetí je dusík nahrazen parním polštářem, tedy tlakem páry, nad hladinou primární vody v kompenzátoru.

### **2.2.2 Části sekundárního a terciálního okruhu**

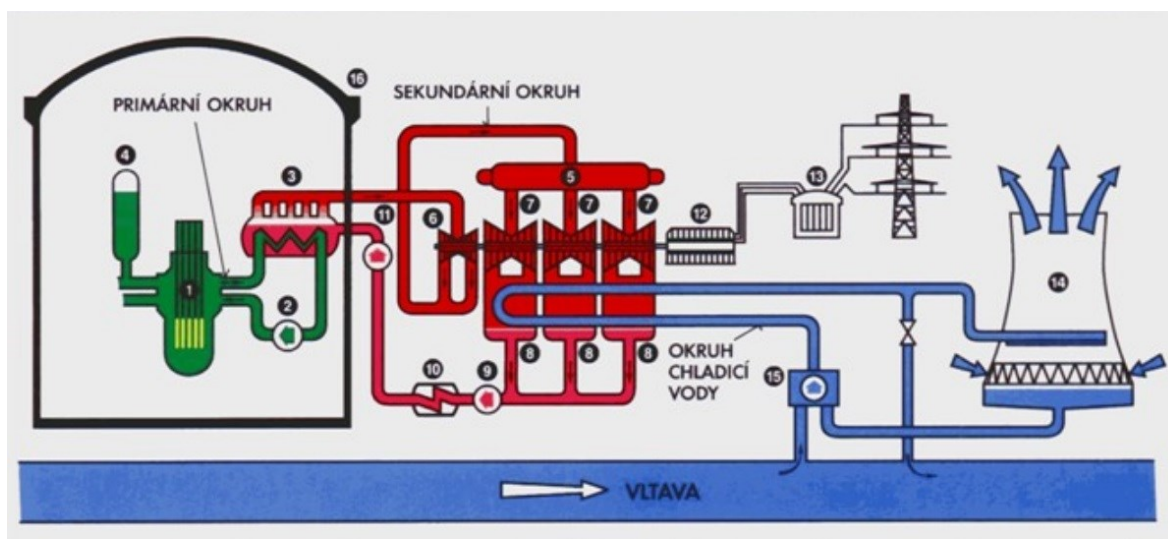
#### **2.2.2.1 Turbosoustrojí**

Turbína je u temelínských bloků pro každý blok jedna a je rozdělena na čtyři části. Sytá pára je z parogenerátorů nejprve přivedena do vysokotlaké části, kde je část její entalpie přeměněna na energii mechanickou, otáčivou. Snížením entalpie se zvýší její vlhkost. Proto následně tato pára prochází separátorem vlhkosti a přehříváčem, aby poté mohla vyexpandovat ve třech nízkotlakých stupních turbíny.

#### **2.2.2.2 Kondenzátor a chladicí okruh**

Kondenzátor tvoří rozhraní mezi sekundárním a terciálním okruhem. Je rozdělen na tři části, umístěné pod nízkotlakými díly turbíny. Vyexpandovaná a zkondenzovaná pára je v kondenzátorech chlazených vodou terciálního okruhu nadále zchlazována, aby pak voda mohla být následně po zregenerování opět vysokotlakými čerpadly čerpána do parogenerátoru. Vodou terciálního okruhu je kondenzační teplo z kondenzátoru odváděno do chladících věží, kde je rozstříkovaná voda přirozeným prouděním vzduchu ochlazována. Z bazénů pod chladícími věžemi je voda zpět čerpána do terciálního okruhu. Vzhledem k tomu, že předpokládaný odpar jedné chladící věže je  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , je třeba vodu do terciálního okruhu doplňovat. [1,10]





- |                               |                            |                          |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1. Jaderný rektor             | 7. Nízkotlaká část turbíny | 12. Elektrický generátor |
| 2. Hlavní cirkulační čerpadlo | 8. Kondenzátor             | 13. Transformátor        |
| 3. Parogenerátor              | 9. Čerpadlo kondenzátoru   | 14. Chladicí věž         |
| 4. Kompenzátor objemu         | 10. Regenerace             | 15. Čerpací stanice      |
| 5. Separátor a přehříváč      | 11. Napájecí čerpadlo      | 16. Kontejnment          |
| 6. Vysokotlaká část turbíny   |                            |                          |

Obr. č. 2.3: Zjednodušené schéma jaderné elektrárny Temelín s rektorem VVER-1000 [1]

## 2.3 JE Temelín – bezpečnostní systémy

### 2.3.1 Aktivní bezpečnostní systémy, třikrát plně zálohované

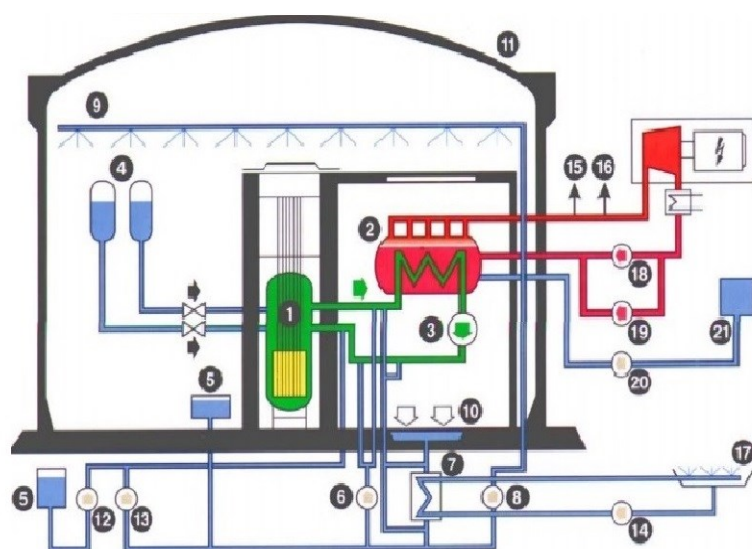
- Nízkotlaký systém havarijního chlazení aktivní zóny: slouží k havarijnímu dochlazování, ale také k dlouhodobému odvodu zbytkového tepla reaktoru.
- Vysokotlaký havarijní doplňovací systém: je určen k doplnění vody do primárního okruhu v případě havárie spojené s jeho netěsností.
- Vysokotlaký systém havarijního chlazení aktivní zóny: tento je určen k udržení aktivní zóny v podkritickém stavu, k zachování vysokého tlaku a chlazení aktivní zóny u havárií spojených se ztrátou chladicího média.
- Sprchový systém kontejnmentu: je určen ke snížení tlaku a teploty v kontejnmentu po havárii LOCA. [1,10]

### 2.3.2 Pasivní bezpečnostní systémy

- Pasivní systém havarijního chlazení aktivní zóny: pomocí čtyř hydro-akumulátorů může být v případě havárie spojené s náhlým poklesem tlaku v primárním okruhu rychle zaplavená aktivní zóna roztokem kyseliny borité.
- Systém ochrany primárního okruhu v případě převýšení tlaku: působením kompenzátoru objemu nebo pojistných ventilů je zabráněno havárii primárního okruhu.
- Systém ochrany sekundárního okruhu: tlak páry v parovodech je v případě potřeby jeho snížení vypouštěn do atmosféry.
- Mechanický systém odstavení reaktorů: v případě havárie systém zajistí pád absorpčních tyčí do aktivní zóny a tím uvede reaktor do podkritického stavu.
- Systém odvodu zbytkového tepla: reaktor i po odstavení produkuje zbytkové teplo, které je třeba z aktivní zóny odvádět. Tímto systémem je zbytkové teplo z odstaveného reaktoru odváděno jako za běžného provozu pomocí parogenerátorů. Při poklesu teploty primárního média pod 150 °C je pak chlazení zabezpečeno chladiči normálního a havarijního dochlazování. Z nich je teplo odváděno okruhem chladicí technické vody důležité. Systém je též určen k havarijnímu dochlazování AZ.
- Systém lokalizace havárií: systém pomocí kontejnmentu zabrání v případě havárie spojené s únikem chladicího média proniknutí radioaktivních látek do vnějšího prostředí.

## 2.4 Maximální projektová havárie JE Temelín

Nejvážnějším druhem havárií v jaderných elektrárnách mohou být havárie spojené se ztrátou chladicího média, jež se označují zkratkou LOCA. S ohledem na možné následky je nejhorší variantou úplné přerušení jedné hlavní studené větve primárního okruhu, a to mezi reaktorem a cirkulačním čerpadlem. Tato havárie, která se označuje zkratkou LB-LOCA, může značně omezit schopnost dochlazování aktivní zóny v průběhu havárie, a tím by mohlo dojít až k jejímu tavení. Při návrhu jaderných elektráren druhé generace se tedy o havárii LB-LOCA uvažovalo jako o maximální projektové havárii. [1,10]



- |  |   |  |
|--|---|--|
| 1. Reaktor   | 8. Sprchové čerpadlo (3x100 %)                          | 15. Přepouštěcí stanice do atmosféry         |
| 2. Parogenerátor   | 9. Havarijní sprchový systém                            | 16. Pojistňovací ventil parogenerátoru       |
| 3. Hlavní cirkulační čerpadlo                                      | 10. Nádrž havarijní zásoby $H_2BO_3$                    | 17. Bazény rozstřiku technické vody důležité |
| 4. Hydroakumulátory  | 11. Kontejnment   | 18. Turbonapájecí čerpadla (3x50 %)          |
| 5. Zásobní nádrž koncentráту bóru                                  | 12. Vysokotlaké havarijní vstřikové čerpadlo (3x100 %)  | 19. Pomocná elektronapájecí čerpadla         |
| 6. Nízkotlaké havarijní doplňovací čerpadlo                        | 13. Vysokotlaké havarijní doplňovací čerpadlo (3x100 %) | 20. Havarijní doplňovací čerpadla            |
| 7. Chladič systému normálního a havarijního dochlazování (3x100 %) | 14. Čerpadlo technické vody důležité (3x100 %)          | 21. Nádrž demineralizované vody              |

*Obr. č. 2.4: Schéma bezpečnostních systémů v JE Temelín [1]*

### **3. APR-1400**

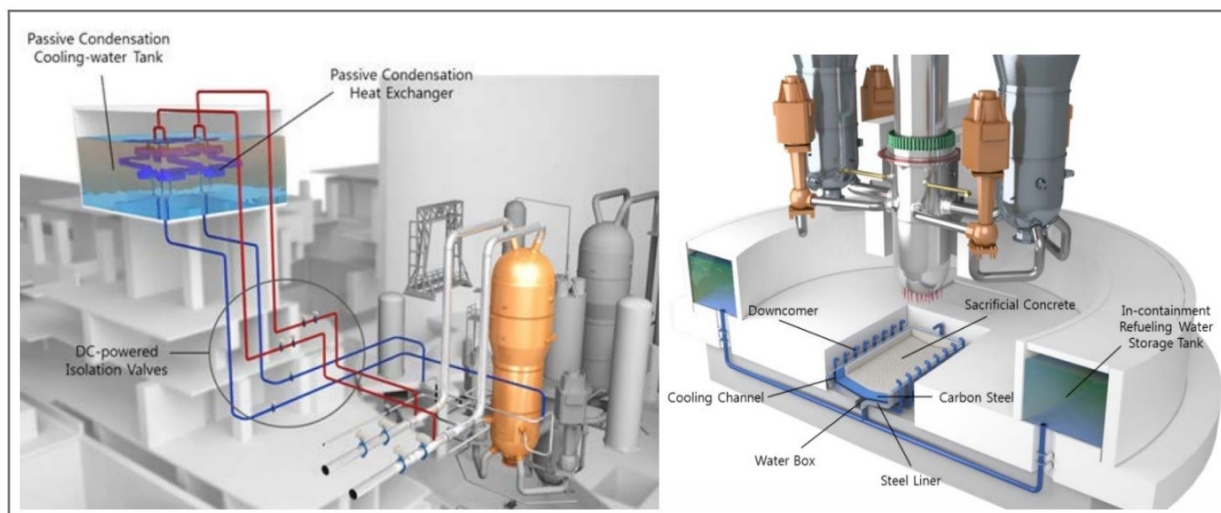
Tlakovodní reaktory APR-1400 od jihokorejské společnosti Korea Hydro & Nuclear Power KHNP, která je dceřinnou společností firmy KEPCO, vychází z konstrukce reaktoru Systém 80+, který vyvinula společnost Westinghouse. Koncept System 80+ byl sice certifikován jaderným dozorem v USA v roce 1997, ale nikdy nebyl komerčně využit. APR-1400 navazuje na bloky OPR-1000, kterých je v Jižní Korei postaveno dvanáct. APR-1400 má vylepšené provozní vlastnosti, údržbu a nižší jsou také investice při výstavbě. Evropský dozor nad technickými požadavky pro jaderné elektrárny konstrukci schválil a udělil certifikaci EUR v roce 2017. Americkým jaderným dozorem byl tento model certifikován v srpnu 2019. První dva bloky s reaktory APR-1400 v elektrárně Shin-Kori vstoupily do komerčního provozu v prosinci 2016 a v září 2019. V současné době jsou v Jižní Korei rozestavěny dva bloky v elektrárně Shin-Hanul a ve Spojených arabských emirátech v elektrárně Barakah čtyři. Spuštění prvního bloku v Bakarah se předpokládá v první polovině roku 2020.

Dalšími projekty vycházejícími z APR-1400 jsou modifikace APR+, EU-APR, US-APR a APR-1000 (1000MWe). Nabízené projekty EU-APR a APR-1000 by měly lépe vyhovovat evropským bezpečnostním požadavkům.

Mezi některá zlepšení projektů EU-APR a APR-1000 patří:

- Použití dvojitého kontejnmentu.
- Zpevněné okolní budovy.
- Lapač roztavené aktivní zóny.
- Implementace evropských norem.

[17,31,37,39]



Obr. č. 3.1: Pasivní systém PAFS a pasivní systém lokalizace a stabilizace taveniny aktivní zóny, určené pro nové bloky EU-APR a APR-1000 [37]

| ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ CHARAKTERISTIKY ENERGOBLOKU APR-1400   |   |
|---|---|
| Název charakteristiky   | Hodnota   |
| 1. Projektová životnost   | 60 let  |
| 2. Výkon energobloku, MW: <ul style="list-style-type: none"> <li>• elektrický (čistý)</li> <li>• elektrický (hrubý)</li> <li>• tepelný</li> </ul> | 1400 MWe<br>1455 MWe<br>4000 MWt  |
| 3. Počet smyček   | 2/4   |
| 4. Průměr horkých větví   | 1067 mm   |
| 5. Průměr studených větví   | 762 mm  |
| 6. Koeficient využití instalovaného výkonu  | > 90%   |
| 7. Tepelná účinnost   | 35,1 %  |
| 8. Palivo <p>Typ paliva</p> <p>Průměrné bohacení</p> <p>Počet palivových souborů</p> <p>Provoz s palivem MOX</p>                                  | $UO_2$ , obsahuje vyhořivací<br>absorbátor $Gd_2O_3$<br>PLUS7<br>4,09 %<br>241<br>do 33 % |
| 9. Průměrné vyhoření paliva   | 60 MWd/kgU  |
| 10. Palivový cyklus   | 18 měsíců   |

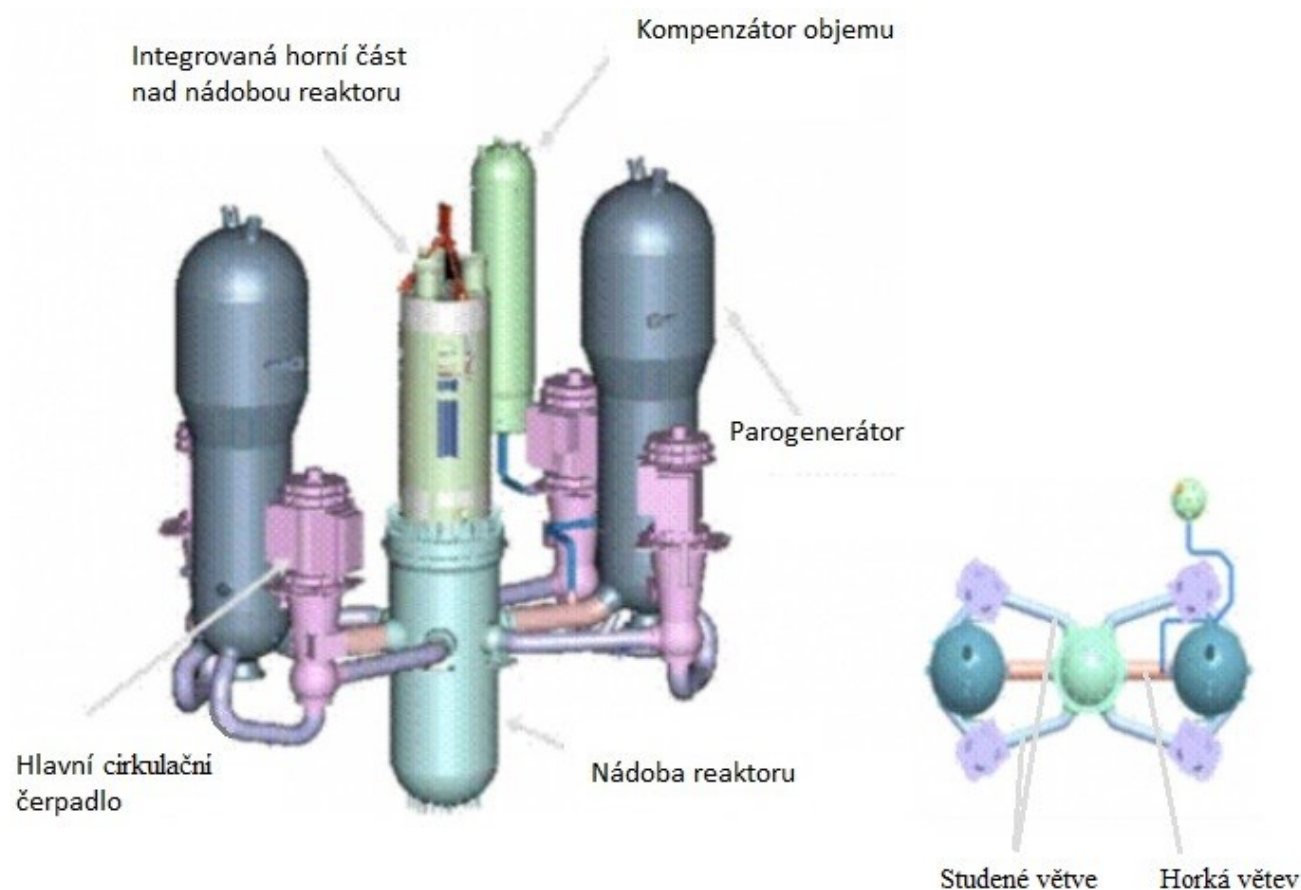
|  |  |
|--|--|
| <p>11. Hlavní parametry chladiva</p> <p>Primární okruh: • teplota na vstupu do aktivní zóny<br/>• teplota na výstupu z aktivní zóny<br/>• minimální průtok chladiva reaktorem<br/>• tlak na výstupu z reaktoru</p> <p>Sekundární okruh: • tlak páry na výstupu z PG<br/>• teplota páry na výstupu<br/>• parní výkon PG<br/>• teplota napájecí vody</p> | <p>290,6 °C<br/>323,9 °C<br/>75567 t /hod<br/>15,5 MPa</p> <p>6,9 MPa<br/>285 °C<br/>4071 t/hod<br/>232,2 °C</p> |
| <p>12. Kontejnment</p> <p><u>Zpevněná ochranná železobetonová obálka (odolná proti pádu letadla)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• průměr</li> <li>• výšková kóta kupole</li> <li>• Projektovaný tlak</li> <li>• Projektovaná teplota</li> </ul>  | <p>45,72 m<br/>76,66 m<br/>0.515 MPa<br/>143.33 °C</p>   |
| <p>13. Celková pravděpodobnost</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• poškození aktivní zóny s jejím tavením</li> </ul>  | <p><math>&lt; 1 \times 10^{-5} / \text{reaktorrok}</math></p>  |

*Tabulka 3.1: Charakteristiky energobloku APR-1400 [18,30,41]*

### 3.1 Primární okruh

Primární okruh bloku APR-1400 je ve dvousmyčkovém uspořádání. Tvoří ho dva, na rozdíl od parogenerátorů ruské konstrukce, vertikálně situované parogenerátory, reaktor, čtyři hlavní oběhová čerpadla a kompenzátor objemu. Primární médium, ohřáté v reaktoru štěpnou reakcí, prochází do parogenerátorů pouze dvěma horkými větvemi. Z parogenerátorů je ochlazené médium zpět do aktivní zóny reaktoru dopravováno čtyřmi studenými větvemi, prostřednictvím čtyř hlavních cirkulačních čerpadel. Tlak média v primárním okruhu činí 15,5 MPa. Teplota chladicího média na vstupu do reaktoru je 290,6°C. Chladicí médium na výstupu z aktivní zóny má teplotu 323,9 °C. Každý z parogenerátorů je z aktivní zóny schopen odvést tepelný výkon 2000 MWt. [18,30]





Obr. č. 3.2: Schéma primárního okruhu [30]

### 3.2 Reaktor

Reaktorová nádoba je složená z válcové střední části, na kterou je navařeno polosférické dno. Ze střední válcové části jsou prostřednictvím hrdel vyvedena cirkulační potrubí teplých a studených větví. Horní polosférická část je odnímatelná a je ke zbytku reaktoru upevněna šrouby. Vnitřní povrchy reaktorové nádoby, které přichází do kontaktu s chladivem, jsou plátovány vrstvou nerezové oceli, jež zabraňuje korozi. Projektová životnost nádoby reaktoru stejně jako ostatních základních součástí je 60 let. Kampaň probíhá v osmnáctiměsíčních cyklech. Reaktor je navržen tak, že v rámci jednoho dne dovoluje změnu výkonu ze 100 % až na 50 %. Je umožněna změna až 5 % výkonu v průběhu jedné minuty.

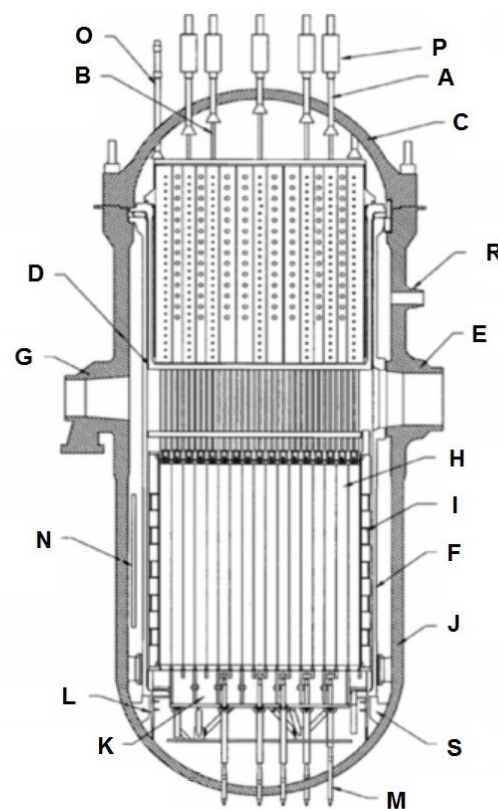
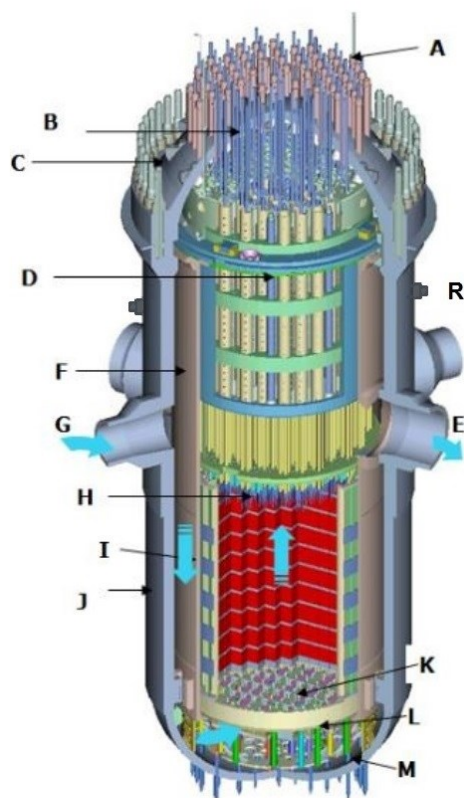
Aktivní zóna reaktoru obsahuje 241 palivových souborů. Každý palivový soubor obsahuje 236 palivových tyčí ve čtverci 16 x 16 pozic. Ve střední části palivového souboru je pozice pro snímače. Tato palivová sestava je označována jako PLUS7. Palivové tyče jsou pokryty vrstvou ze slitiny zirkonia a niobu. Pozice palivových tyčí v souboru je udržována

distančními mřížkami, které obsahují lopatky vytvářející turbulentní proudění přes palivové tyče. Palivové tyče mají aktivní délku 3,81 m a v každé palivové tyči je obsaženo 365 uranových tablet o hmotnosti 5,2 g. Palivové tablety jsou uvnitř tyče stlačené pružinou a z důvodu lepšího přenosu tepla jsou tyče plněné heliem. Palivo je tvořeno oxidem uraničitým s průměrným obohacením 4,09 %  $^{235}\text{U}$ . Reaktor je naprojektován tak, že je možné jej provozovat i se směsným MOX palivem, a to až do 33 % využití aktivní zóny.

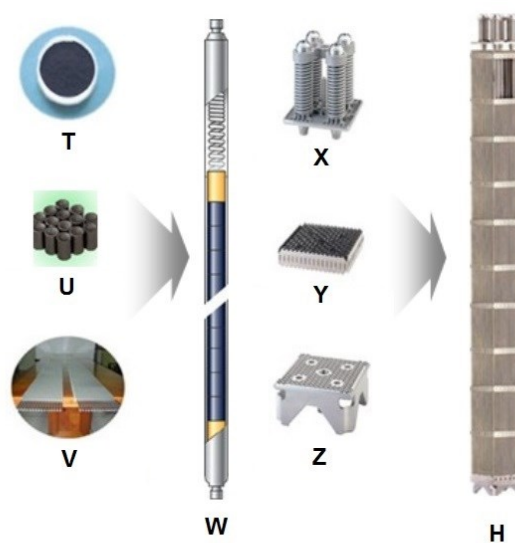
Řídící tyče jsou plněny peletami z karbidu Boru. Část palivových tyčí obsahuje uranové palivo míchané s oxidy gadolinia, což je pomalu vyhořívající absorbátor neutronů. Snižování koncentrace tohoto prvku v průběhu vyhořívání paliva vnáší do procesu kladnou reaktivitu, a je tak umožněn delší provoz reaktoru s konstantním výkonem i při ubývání štěpných materiálů v aktivní zóně. V aktivní zóně jsou rovnoměrně rozmístěny také kanály určené k vnitro-reaktorovému měření a monitorování neutronového toku.

Vnější průměr reaktoru je 5,22 m, vnitřní délka 14,8 m a hmotnost činí 573 t.

[18,30,35]



- A- Vodítka nástavců řídicích tyčí
- B- Sestava nástavců řídicích tyčí
- C- Sestava víka reaktoru
- D- Horní vodící konstrukce
- E- Výstupní hrdlo
- F- Šachta
- G- Vstupní hrdlo
- H- Palivové soubory
- I- Plášť jádra
- J- Reaktorová nádoba
- K- Dolní podpěrná konstrukce
- L- Průtoková clona
- M- Spodní vodítka
- N- Svědečný materiál
- O- Vstup pro termočlánek
- P- Pohony řídicích tyčí
- R- Hrdlo systému DVI
- S- Doraz



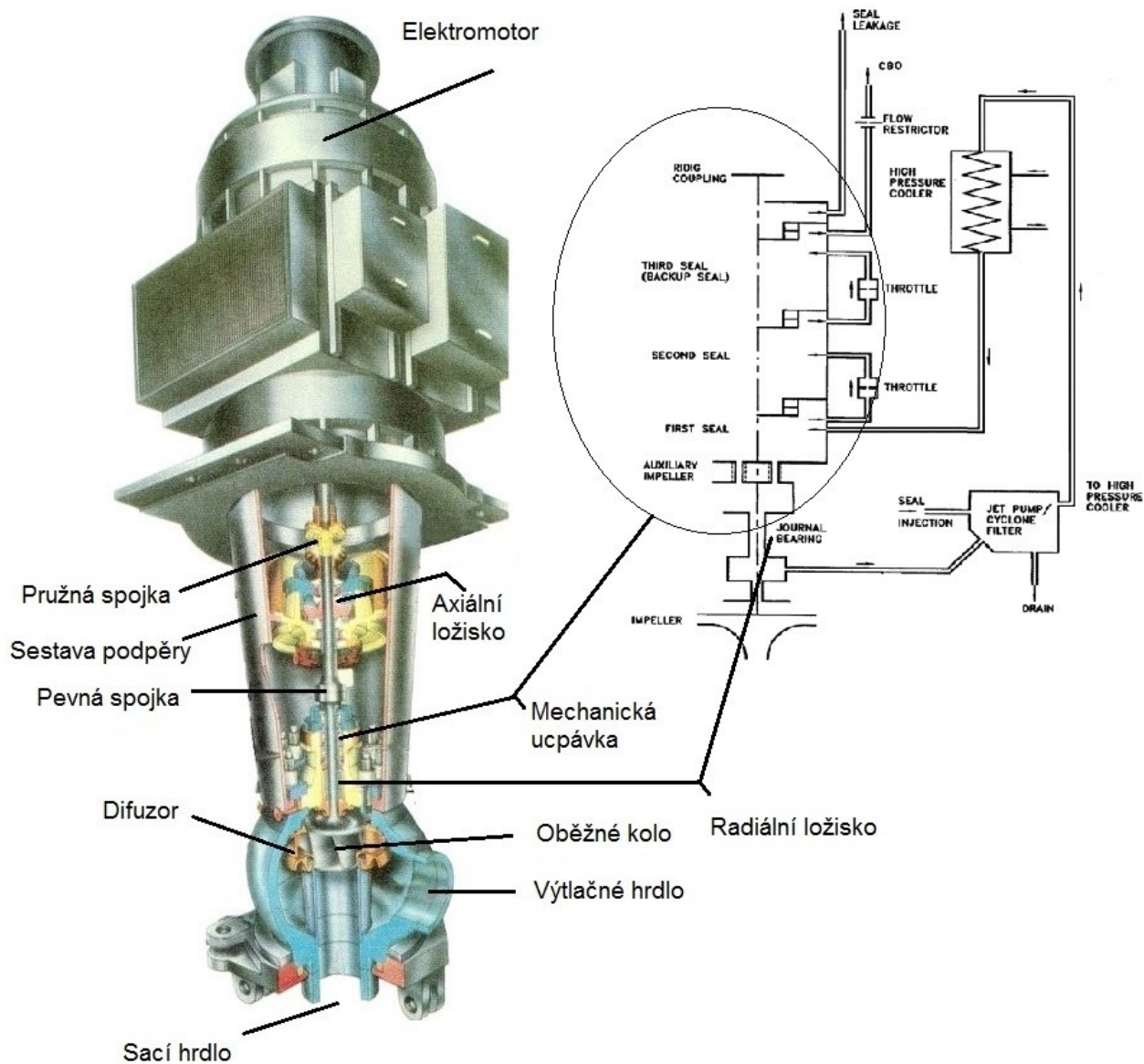
- T- Uranový prášek
- U- Uranové tablety
- V- Opláštění paliva
- W- Palivová tyč
- X- Výměnný horní díl
- Y- Distanční a vířící mřížky
- Z- Spodní filtrační díl

Obr. č. 3.3: Reaktor APR - 1400 [35,36,37]

### 3.3 Hlavní cirkulační čerpadlo

Bloky APR-1400 jsou osazeny čtyřmi vertikálně situovanými, odstředivými, jednostupňovými cirkulačními čerpadly. Ta jsou včleněna do každé z chladných větví a zabezpečují, že jsou čerpadla poháněna jednorychlostními, asynchronními motory, pracujícími se sítovou frekvencí 60 Hz. V projektech bloků EU-APR a APR-1000, které jsou koncipovány na sítovou frekvenci 50 Hz, je zřejmě nějakým konstrukčním řešením ošetřen snížený průtok aktivní zónou, který vyplývá z použití stávajících elektromotorů na nižším kmitočtu. Toto se týká i bloků stavěných v SAE.

Hřídel čerpadla je těsněna proti úniku chladícího média trojstupňovou, vodou chlazenou, mechanickou ucpávkou. Radiální ložisko nad oběžným kolem je mazáno a chlazeno vodou, což vylučuje průnik oleje do primárního média. Radiálně-axiální ložisko nad ním je mazáno olejem. Čerpadla jsou vybavena setrvačником zabezpečujícím delší doběh a dobu chlazení aktivní zóny po případném výpadku elektrického napájení čerpadel. Každé z čerpadel je schopno odvést třetinu maximálního tepelného výkonu z aktivní zóny. Při výpadku jednoho z čerpadel jsou zbylá tři schopná zabezpečit chlazení aktivní zóny bez nutnosti snižování výkonu reaktoru. [27,35,37]



Obr. č. 3.4: Hlavní cirkulační čerpadlo bloku APR-1400 [33,35]

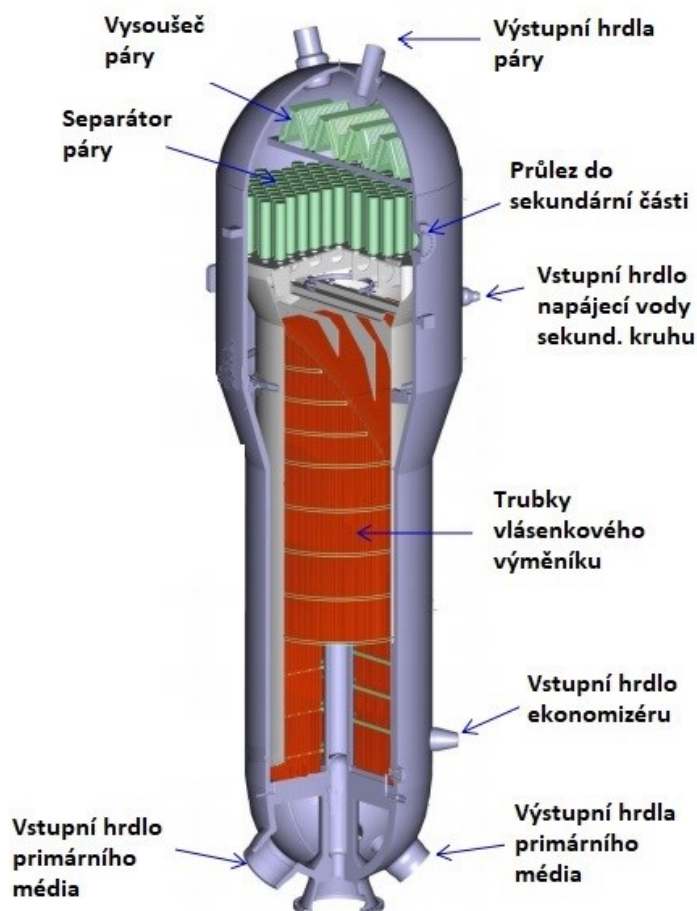
| HLAVNÍ CÍRKULAČNÍ ČERPADLO BLOKU APR-1400 |                         |
|---|-------------------------|
| PARAMETR                                  | HODNOTA                 |
| Výkon v studeném režimu                   | 10,07 MW                |
| Výkon v horkém režimu                     | 7,46 MW                 |
| Otáčky                                    | 1190 ot. /min           |
| Dopravované množství média                | 27615 m <sup>3</sup> /h |
| Frekvence napájecího napětí               | 60 Hz                   |

Tabulka 3.2: Parametry hlavního cirkulačního čerpadla bloku APR-1400 [18,33]



### 3.4 Parogenerátor

Parogenerátory u bloků APR-1400 jsou jako u jiných bloků vycházejících ze západních konstrukcí situovány vertikálně. Očekávaná životnost parogenerátorů je 60 let. Teplosměnné plochy jsou tvořeny trubkami tvarovanými do obráceného písmene U. Trubky jsou vyrobeny z vhodnějšího nerezového materiálu Inconel 690. Materiál Inconel 600, který se používal v předchozích konstrukcích, má větší obsah niklu a projevuje se u něj větší sklon k praskání a korozi. Parogenerátor má v sobě integrován ekonomizér napájecí vody, čímž se zvyšuje jeho celková tepelná účinnost. Každé ze dvou hlavních parních potrubí vycházejících z parogenerátorů je osazeno pojistnými ventily. V parogenerátorech je zabudován omezovač průtoku, který by sehrál pozitivní úlohu v případě porušení parního potrubí a masivního úniku páry. Parogenerátory jsou vybaveny vysokovýkonnými odlučovači vlhkosti a vysoušeči páry. [27,30,33]



Obr. č. 3.5: Schéma parogenerátoru [33,39]

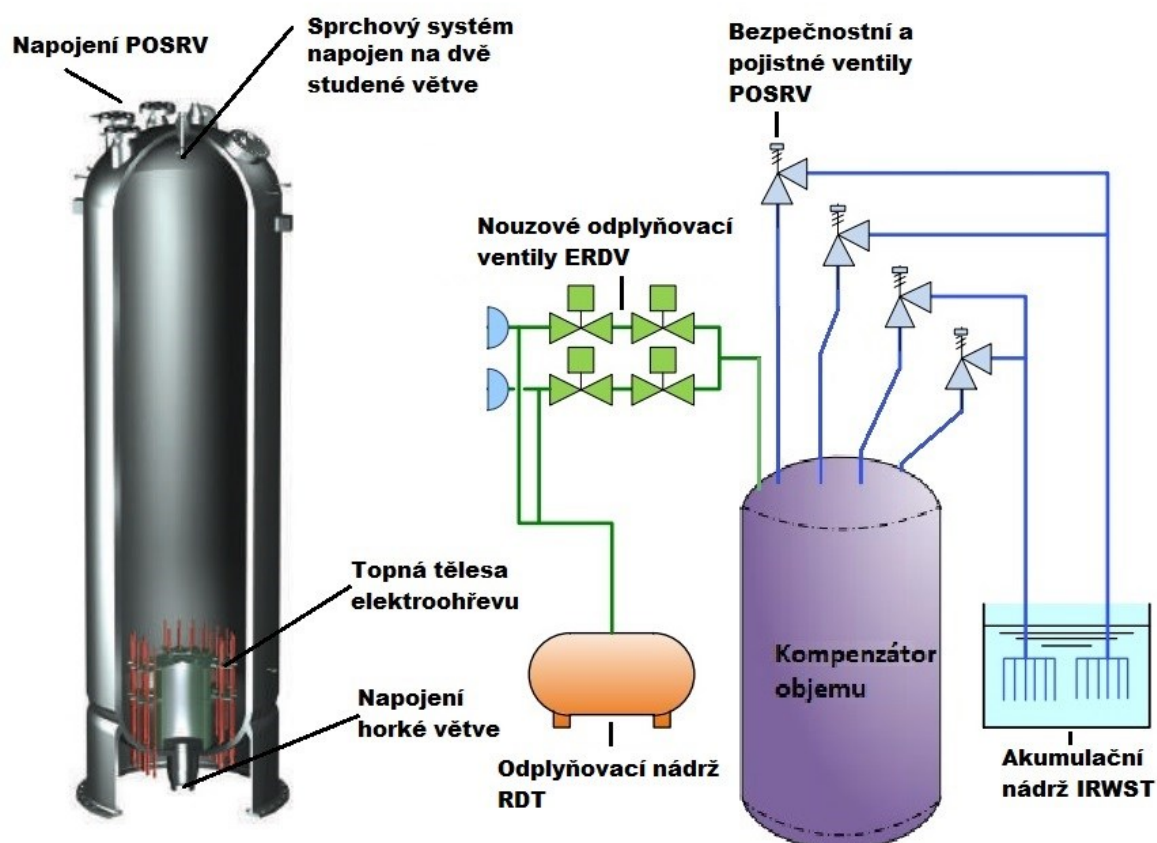


| PAROGENERÁTOR BLOKU APR-1400           |                      |
|--|----------------------|
| PARAMETR                               | HODNOTA              |
| Počet parogenerátorů                   | 2 ks                 |
| Teplosměnná plocha jednoho PG          | 15205 m <sup>2</sup> |
| Vnější průměr teplosměnných trubek     | 19,05 mm             |
| Počet trubek v parogenerátoru          | 13102 ks             |
| Teplota páry při plném výkonu          | 285 °C               |
| Tlak páry při plném výkonu             | 6,9 MPa              |
| Teplota napájecí vody při plném výkonu | 232 °C               |
| Množství vyrobené páry v jednom PG     | 4071 t/h             |
| Pracovní tlak v primárním okruhu       | 15,5 MPa             |
| Transportní hmotnost                   | 832.7 t              |

Tabulka 3.3: Parogenerátor bloku APR-1400 [42]

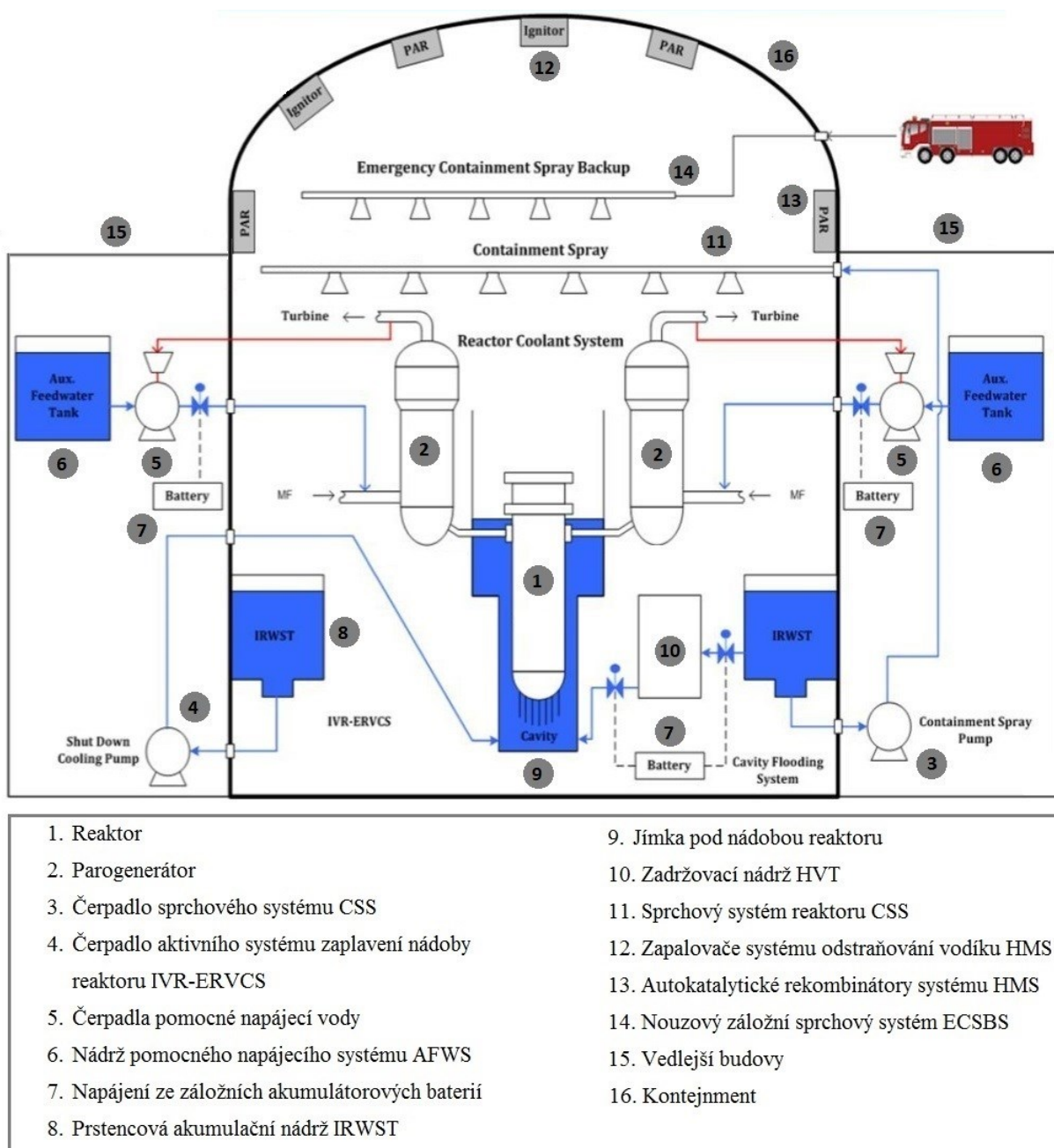
### 3.5 Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu je svisle uložená tlaková nádoba válcového tvaru o objemu téměř 68 m<sup>3</sup>, přičemž při plném výkonu bloku pojme téměř 33,2 m<sup>3</sup> primárního média. Je určen k udržování tlaku a objemu média v požadovaných mezích, k čemuž slouží jeho přístrojové vybavení. Provozní teplota kompenzátoru je 345 °C a provozní tlak 15,5 MPa. Spodním hrdlem je napojen na jednu z horkých větví primárního okruhu. Středem horní části kompenzátoru jsou dovnitř zaústěny sprchovací trysky, prostřednictvím kterých je možné médiem ze dvou studených větví připojených přes regulační ventily na výtlak cirkulačních čerpadel snižovat tlak a teplotu v primárním okruhu. Ve dně nádoby jsou osazená vyměnitelná tělesa elektrického ohřevu o celkovém výkonu 2,4 MW. Kompenzátor je napojen na bezpečnostní systém SDVS, kdy prostřednictvím pojistných ventilů POSRV může být snížen případný havarijní přetlak tak, že je část primárního média přes tyto ventily odvedena do nádrže IRWST, která slouží také jako zásobník vody při výměně paliva v reaktoru. [27,35]



Obr. č. 3.6: Kompenzátor objemu a přetlakový systém v JE Shin-Kori 5 a 6 blok [27,42]

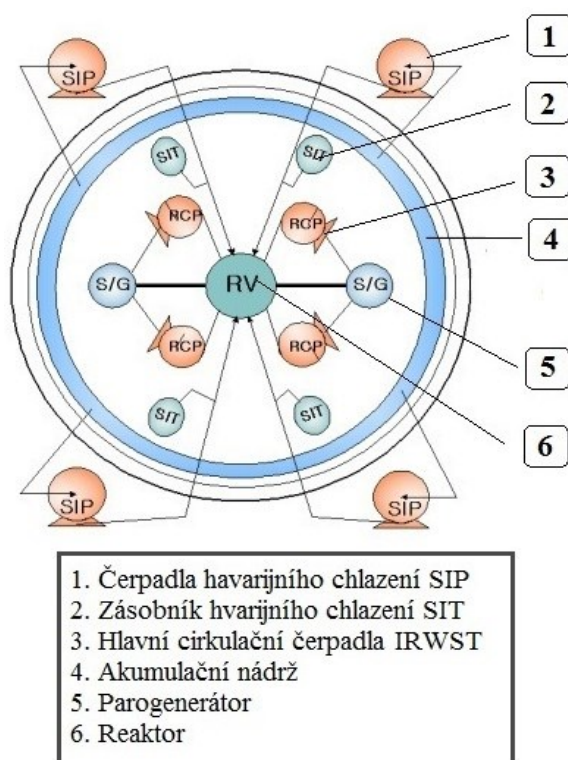
### 3.6 Bezpečnostní systémy APR-1400



Obr. č. 3.7: Schéma bezpečnostních systémů bloku APR-1400 [29,32]

### 3.6.1 Systém havarijního chlazení aktivní zóny SIS

V případě havárie, jejímž důsledkem by byla masivní ztráta chladícího primárního média, tento aktivní systém, viz obr.3.8, vstřikuje do primárního okruhu vodu prostřednictvím havarijních čerpadel SIP. Systém je tvořen ze čtyř nezávislých tras, z nichž každá je samostatně schopna z reaktoru odvést veškerý zbytkový tepelný výkon. Redundance systému je 4 x 100 %. Voda obsahující kyselinu boritou je vstřikována přímo do aktivní zóny reaktoru a zabezpečuje tak jeho chlazení. Vstřikováním přímo do reaktoru přes hrdla DVI je zajištěno intenzivní chlazení aktivní zóny i v případě prasknutí chladné větve primárního okruhu, kdy by vstřikovaná voda mohla unikat touto prasklinou, aniž by ochladila reaktor. Součástí systému SIS jsou bezpečnostní akumulární zásobníky SIT. Voda je v nich udržována pod tlakem dusíku 4 MPa. V případě aktivace systému SIS je voda ze zásobníků SIT dávkována dvoustupňově. V zásobníku je instalováno pasivní zařízení FD. Toto zařízení, pracující na hydrodynamickém principu, omezí ve druhém stupni výtakovou rychlost, a je tak prodloužena doba, která je nutná ke spuštění čerpadel SIP, které pak čerpají vodu z nádrže IRWST. Díky prodloužení doby pasivního chlazení aktivní zóny ze zásobníků SIT bylo možné z projektu vyřadit nízkotlaká havarijní čerpadla. [35,42]

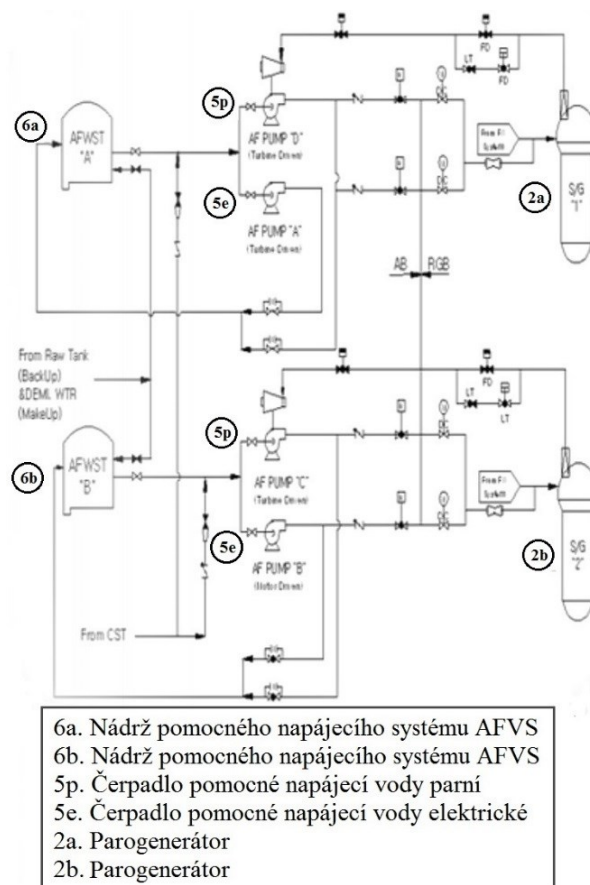


Obr. č. 3.8: Schéma systému SIS [32]

### 3.6.2 Pomocný napájecí systém – AFWS

Tento systém obr. 3.7 a obr. 3.9 by byl aktivován v případě nedostupnosti žádného střídavého elektrického napájení, kdy by nebylo k dispozici ani napájení ze dvou záložních dieselagregátů. V tom případě by nebyly k dispozici žádné aktivní bezpečnostní systémy včetně SIS a SCS. V činnosti by byly udržovány pouze nezbytné kontrolní a monitorovací systémy, a to napájením z akumulátorových baterií po dobu šestnácti hodin.

Systém je tvořen ze dvou nezávislých větví, kde v každé jsou z důvodu spolehlivosti systému zařazena vždy dvě čerpadla, jedno poháněné elektromotorem a jedno parní turbínou. Voda je odebírána ze dvou nezávislých akumulčních nádrží AFWT, které jsou včetně čerpadel umístěny mimo kontejnment ve vedlejší budově. Napájecí voda by byla do sekundárních okruhů parogenerátorů tímto systémem přiváděna při událostech, kdy hlavní napájecí voda není k dispozici z důvodu výpadku střídavých napájecích napětí nebo při poruše parního potrubí sekundárního okruhu spojeného s menším únikem. Při výpadku střídavého napájení sice systémy zastavují štěpnou reakci, nicméně ihned po odstavení reaktor produkuje přibližně 7 % svého výkonu ve formě tepla, které je ve snaze zabránit roztavení aktivní zóny třeba z reaktoru odvádět. Primární okruh je pro tyto situace navržen tak, aby v něm i za okolností, kdy nejsou v provozu čerpadla primárního okruhu, docházelo k přirozené cirkulaci, ochlazování aktivní zóny a následně vývinu páry v parogenerátorech pro potřeby AFWS, tedy k pohonu turbínových čerpadel. Přebytná pára by byla ze sekundárního okruhu odváděna pomocí pojistných ventilů. AFWS tedy poskytuje jistý čas k obnově dodávky střídavého napájení. [30,42]



Obr. č. 3.9: Schéma systému AFWS [29]

### 3.6.3 Systém chlazení po odstavení reaktoru – SCS

Systém slouží ke snížení teploty chladicího média v primárním okruhu z provozní teploty až na teplotu 48,9 °C a k jejímu udržování. To je teplota, při které je možná výměna paliva v reaktoru. V první fázi po odstavení reaktoru je teplo z reaktoru odváděno přes parogenerátory do kondenzátoru, nebo do atmosféry. SCS je uváděn do činnosti při teplotě primárního média 176,7 °C a tlaku 3,16 MPa. [42]

### 3.6.4 Zaplavení prostor pod reaktorem a chlazení pláště reaktoru vodou IVR-ERVCS

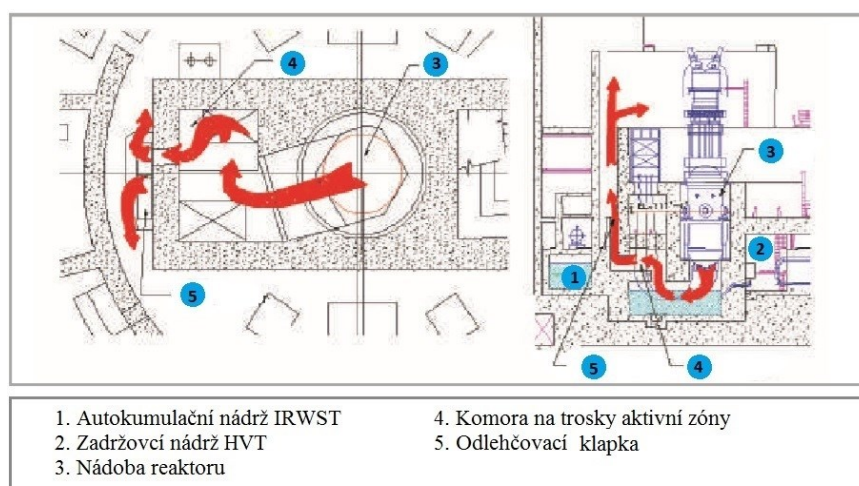
Tento aktivní systém obr. 3.7 je určen ke snížení následků těžkých havárií, kdy je snaha chladit aktivní zónu takovým způsobem, aby nedošlo k jejímu přehřátí a následnému protavení stěny reaktorové nádoby. Situaci uvnitř reaktorové nádoby v okamžiku ztráty tlaku v primárním okruhu komplikuje vývin páry, která může bránit účinnému chlazení aktivní zóny. Teplota stěny palivových proutků v případě havárie by neměla přesáhnout 350 °C, protože pak dochází k jejich destrukci a uvolnění štěpných produktů do chladicího média.



V případě, že by v důsledku selhání havarijních systémů ochlazujících aktivní zónu došlo k jejímu tavení, systém IVR-ERVCS zaplaví prostřednictvím čerpadel vodou z nádrže IRWST šachtu pod reaktorem, ve snaze zabránit ochlazováním reaktorové nádoby úniku korie. [1,42]

### 3.6.5 Zaplavení prostor pod reaktorem vodou – CFS

Tento pasivní systém obr. 3.7 a obr. 3.10 zabraňuje přímému ohřevu kontejnmentu v případě těžké havárie, kdy by roztavené jádro reaktoru proniklo skrz nádobu až do jímky zaplavené vodou, která se nachází pod ním. Jímka pod reaktorem by byla plněna vodou z nádrže IRWST dvěma nezávislými potrubími, kdy každé je osazeno uzavíracími ventily. Voda ohřívána korigem by vlivem přirozeného proudění cirkulovala, ale nevynášela by ho nahoru do kontejnmentu. Štěpný materiál by se shromažďoval v příslušné komoře. [42]



Obr. č. 3.10: Schéma zaplavení šachty pod reaktorem [27]

### 3.6.6 Sprchový systém kontejnmentu – CSS

Systém obr. 3.7 je určen ke snižování tlaku a teploty uvnitř kontejnmentu u havárií spojených se ztrátou chladicího média, kdy dochází k rychlému nárustu teploty a tlaku uvnitř kontejnmentu. Systém je napájen z nádrže IRWST, voda je čerpána čerpadly a následně rozstříkována hlavicemi umístěnými v horní části kontejnmentu rovnoměrně po celé jeho ploše. Systém je tvořen dvěma nezávislými trasami a je propojen se systémem SCS. Čerpadla systémů CSS a SCS jsou z důvodu vyšší spolehlivosti systému typově i kapacitně stejná. [30,42]

### **3.6.7 Nouzový záložní sprchový systém – ECSBS**

Stejně jako CSS, slouží ECBS na obr. 3.7 k redukování tlaku a teploty uvnitř kontejnmentu v případě těžkých havárií, a přispívá tak ke snížení hrozby porušení jeho integrity. Voda pro tento systém je dodávána externím čerpadlem z externího zdroje do potrubí, hermeticky utěsněného, procházejícího skrz stěnu kontejnmentu a je rovnoměrně rozstříkována podobně jako u CSS. Systém může zajistit dlouhodobější chladitelnost. Po 48 hodinách provozu systému ECSBS by měly být tlak a teplota uvnitř kontejnmentu dostatečně sníženy.

### **3.6.8 Akumulační nádrž na vodu k výměně paliva uvnitř kontejnmentu – IRWST**

Akumulační nádrž IRWST na obr. 3.7 je prstencová nádrž o objemu 2470 m<sup>3</sup>, umístěná uvnitř kontejnmentu v jeho dolní části a poskytuje zásobu vody pro všechny systémy kromě pomocného napájecího systému AFWS. Její umístění uvnitř kontejnmentu ji činí méně citlivou na vnější rizika.

Nádrž IRWST je jediným zdrojem vody potřebným pro výměnu paliva, havarijní chlazení i čerpadla napájející sprchovací zařízení uvnitř kontejnmentu. Je do ní také zaústěn výstup z ventilů POSRV obr. 3.6. Nádrž je také propojena se zadržovací nádrží HVT. V případě těžké havárie, kdyby došlo k tavení jádra reaktoru, by byly vodou z této nádrže zaplaveny prostory kolem reaktorové nádoby ve snaze reaktor chladit a udržet taveninu uvnitř ní. [30,42]

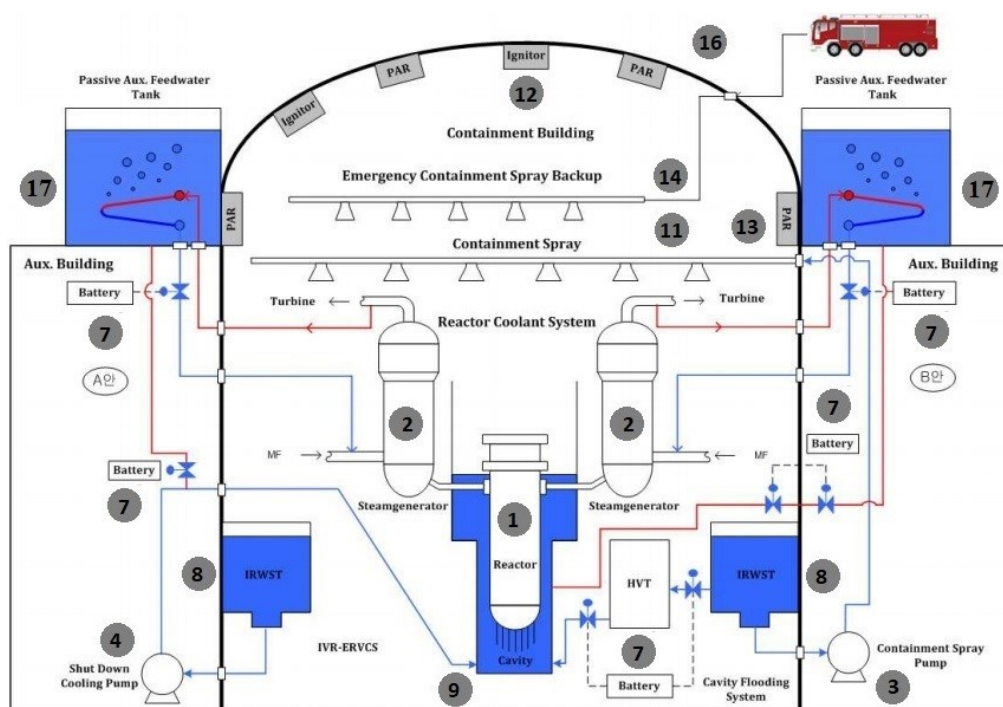
### **3.6.9 Systém odstraňování vodíku – HMS**

Systém HMS, viz obr. 3.7, pomáhá v případě těžké havárie, kdy může vznikat vodík, udržet v kontejnmentu jeho průměrnou koncentraci pod 10 %, aby případnou explozí nebyla ohrožena jeho integrita. Kapacita systému je navržena tak, aby zvládl zpracovat 100 % vodíku vznikajícího při reakci roztaveného jádra reaktoru s vodou. Je složen z 26 pasivních autokatalytických rekombinátorů PAR rozmístěných rovnoměrně v kontejnmentu. Tyto by byly schopny svou funkci plnit za předpokladu pomalého uvolňování vodíku. Vzhledem k tomu, že v situaci těžké havárie je předpokládáno jeho rychlejší uvolňování, je systém doplněn o zapalovače umístěné v blízkosti jednotek PAR, a v případě rychlého vývinu vodíku by docházelo k jeho řízenému spalování. [27]



### 3.6.10 Pasivní pomocný napájecí systém – PAFS

System je aplikován v projektu APR+, viz. obr. 3.1 a obr. 3.11. Je pasivní variantou aktivního systému AFWS, viz obr. 3.7, využívaného v blocích APR-1400. Je složen ze čtyř nezávislých okruhů. Při odvádění zbytkového tepla z aktivní zóny, přes sekundární okruh parogenerátorů do výměníků ponořených v nádržích PAFT, je využito přirozené cirkulace. System je navržen tak, aby mohl pracovat minimálně po dobu osmi hodin bez závislosti na střídavém elektrickém napájení. [28]



- |   |   |
|---|---|
| 1. Reaktor  | 9. Jímka pod nádobou reaktoru                         |
| 2. Parogenerátor  | 10. Zadržovací nádrž HVT                              |
| 3. Čerpadlo sprchového systému CSS                                | 11. Sprchový systém reaktoru CSS                      |
| 4. Čerpadlo aktivního systému zaplavení nádoby reaktoru IVR-ERVCS | 12. Zapalovače systému odstraňování vodíku HMS        |
|   | 13. Autokatalytické rekombinátory systému HMS         |
|   | 14. Nouzový záložní sprchový systém ECSBS             |
|   | 15. Vedlejší budovy                                   |
| 7. Napájení ze záložních akumulátorových baterií                  | 16. Kontejnment                                       |
| 8. Prstencová akumulční nádrž IRWST                               | 17. Nádrž pasivního pomocného napájecího systému PAFS |

Obr. č. 3.11: Schéma bezpečnostních systémů projektu APR+ [28]

### **3.6.11 Přetlaková ochrana primárního okruhu**

Tlak a teplota v primárním okruhu se přednostně reguluje sprchováním ze studených větví v kompenzátoru objemu. Pokud v dané situaci nepracuje tento mechanismus dostatečně, může být tlak snížen systémem SDVS, obr. 3.6.

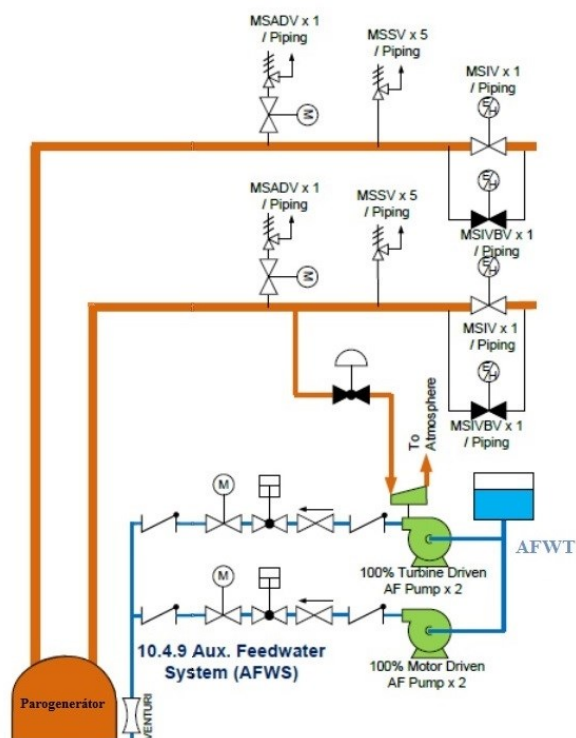
#### **3.6.11.1 Systém odplynění a odtlakování primárního okruhu SDVS**

Tento systém je určen ke zmírňování následků závažných havárií, kdy by vysoká teplota jádra reaktoru v kombinaci s vysokým tlakem mohla způsobit roztavení dna reaktorové nádoby a únik koria. Snížením tlaku v primárním okruhu přetlakovými a pojistnými ventily POSRV lze toto riziko zmírnit. POSRV jsou součástí čtyř nezávislých okruhů, kterými je přetlak primárního média odpouštěn z kompenzátoru objemu do akumulární nádrže IRWST.

Součástí SDVS jsou nouzové odplyňovací ventily ERDV a odplyňovací nádrž RDT. V havarijních situacích, kdy by došlo v primárním okruhu k tvorbě značného množství páry a následkem tavení aktivní zóny i vodíku, byl by tento z kompenzátoru odváděn do odplyňovací nádrže. U předešlých řešení bez ERDV, kdy byla veškerá paroplynová směs a voda odváděna do nádrže IRWST, hrozilo následné uvolňování vodíku z této nádrže a vznik jeho nebezpečné koncentrace v kontejnmentu.

### **3.6.12 Přetlaková ochrana sekundárního okruhu**

Přetlak v sekundárním okruhu je snižován aktivací příslušných ventilů. Na každém ze dvou parních potrubí vystupujících z parogenerátorů, je osazeno 5 pojistných ventilů, 1 odvzdušňovací ventil a 1 uzavírací ventil. [28,42]



Obr. č. 3.12: Schéma sekundárního přetlakového systému [42]

### 3.6.13 Kontejnment

Budova kontejnmentu u bloků APR-1400 je navržena tak, aby bylo zabráněno úniku radioaktivních materiálů do okolního prostředí i v případě nadprojektových havárií. Je vyrobena z předpjatého betonu vyztuženého armováním. Konstrukčním prvkem, který zabraňuje úniku radioaktivních materiálů, je pokrytí jeho vnitřní stěny ocelovým plechem o síle více než 6 mm. Šířka stěny válcové části je 1,37 m, stěna kupole je široká 1,2 m.

#### Další vlastnosti:

- maximální teplota 143 °C
- maximální přetlak 0,515 MPa
- odolnost proti zemětřesení 0,3 g
- odolnost do rychlosti větru 322 km/h
- odolnost proti nárazu letadla Boeing 767-400 v rychlosti 540 km/h [36]

## **4. VVER-1200**

Jaderné elektrárny generace III+, osazené pokročilými tlakovodními reaktory východní koncepce VVER-1200, navazují na lety prověřená technická řešení. Tato jsou aplikovaná na mnoha desítkách jaderných bloků VVER-1000 postavených a provozovaných ve světě. V rámci České republiky je dvěma bloky druhé generace VVER-1000 ve verzi V-320 osazena jaderná elektrárna Temelín.

Referenčními jadernými zdroji s reaktory VVER-1200 ve verzi V-392M jsou v současné době dva spuštěné bloky v elektrárně Novovoronež II a jeden blok ve verzi V-491 v jaderné elektrárně Leningrad II. Verze V-392M a V-491 se do jisté míry odlišují. V roce 2020 se předpokládá spuštění dalších dvou bloků v Bělorusku v elektrárně Ostrovec I a II.

V Novovoroneži byl postaven první blok generace III+ na světě. Novovoronežské bloky verze V-392M zpracovala firma Atomenergoprojekt Moskva a svou koncepcí jsou určeny do seizmicky aktivnějších oblastí.

Leningradské bloky verze V-491 projektovala firma Atomprojekt z Petrohradu tak, aby odpovídaly striktním evropským požadavkům. Za skutečně referenční blok splňující evropské požadavky se tedy v současnosti dá považovat jeden blok spuštěný a jeden ve výstavbě v elektrárně Leningrad II. [12,21,23]

### **Úkoly řešené v projektu VVER-1200 (AES – 2006):**

- Minimalizování rizik a vylepšení provozních charakteristik za pomoci již dříve osvědčených technických řešení.
- Využití projektových rezerv, jejich optimalizace a odstranění nadbytečné konzervativnosti.
- Zajištění bezpečnosti na požadované úrovni, a to i při nadprojektových haváriích, na základě racionálního výběru bezpečnostních systémů používajících pasívní i aktivní bezpečnostní prvky. To dovoluje ve větší míře realizovat princip různorodosti a snížit vliv lidského faktoru.
- Snížení investičních nákladů z důvodů:
  - Využití sériově vyráběných dílů.
  - Optimalizace rozhodnutí, jak nakládat s vyhořelým palivem.
  - Vylepšení technologie oprav.
  - Optimalizace počtu provozních a servisních pracovníků.

- Zajištění konkurenceschopnosti ve srovnání s jinými zdroji elektrické energie.
- Minimalizování doby nutné pro výstavbu bloku.
- Zvýšení životnosti nevyměnitelných zařízení na minimálně 60 let.
- Zabezpečení před haváriemi, využitím dostatečných bezpečnostních rezerv a rezerv energií po dostatečně dlouhou dobu.
- Odolnost vůči lidským chybám vůči vnějším a vnitřním vlivům, ať už za provozních režimů reaktoru, nebo při jeho odstavení.
- Zohlednění nových požadavků vzešlých z analýz havárie JE Fukušima.
- Základní části projektu vhodné pro široký rozsah klimatických podmínek a unifikace hlavních a pomocných zařízení.
- Atraktivita pro potenciální zákazníky v oblasti použité techniky, míry bezpečnosti, jednoduché ovladatelnosti a servisovatelnosti.
- Minimalizace množství průmyslového odpadu, zejména radioaktivního.
- Možnost vyřazení zařízení z provozu po konci životnosti, jeho ekologická likvidace s ohledem na minimální zátěž pro životní prostředí a přijatelné náklady.
- Zajištění kvalitně zpracované dokumentace založené na dodržování norem domácích i řady ISO 9000, EUR, INSAG, ICRP, IEC.

#### **Hlavní rozdíly mezi projektem VVER-1200 a VVER-1000 předchozí generace:**

- Čtyři na sobě nezávislé linie bezpečnostních systémů.
- Odvod zbytkového tepla z aktivní zóny pomocí kombinace aktivních a pasivních bezpečnostních systémů, které nevyžadují obsluhu.
- Systém zachytu a chlazení taveniny v případě úniku z aktivní zóny.
- Systém pro monitoring a snižování obsahu vodíku v kontejnmentu.
- Dvojitý kontejnment, pokrývající ať už následky událostí uvnitř kontejnmentu, nebo působení vnějších vlivů. [11]

| <b>ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ CHARAKTERISTIKY ENERGOBLOKU VVER-1200 (AES-2006)</b>  |   |
|---|---|
| <b>Název charakteristiky</b>  | <b>Hodnota</b>  |
| 14. Projektová životnost  | 60 let  |
| 15. Výkon energobloku, MW:<br>• elektrický (hrubý)<br>• elektrický (čistý)<br>• tepelný   | 1198 MWe *)<br>1113 MWe *)<br>3200 MWt  |
| 16. Teplofikační výkon bloku  | <300 MWt *)   |
| 17. Koeficient využití instalovaného výkonu   | > 90%   |
| 18. Spotřeba elektrické energie na vlastní spotřebu (včetně spotřeby na recirkulační zásobování vodou a potřeb stavby)  | 7,0 % *)  |
| 19. Měrná spotřeba tepla (hrubá)  | 9932,8 kJ/kWh *   |
| 20. Účinnost energobloku při provozu turbíny v kondenzačním provozním režimu:<br>• hrubá<br>• čistá   | 37,4 %*)<br>34,8 %*)  |
| 21. Neplánované automatické odstavení reaktoru  | <0,5 roku   |
| 22. Doba trvání plánovaných odstávek (výměna paliva reaktoru, plánované práce, plánované opravy) během sedmi let provozu (doba mezi dvěma velkými opravami s demontáží turbínového zařízení, činí 8 let) maximálně. | 4 x po 16 dnech<br>2 x po 24 dnech<br>1 x 30 dní                                |
| 23. Doba trvání plánovaných odstávek na údržbu každý osmý rok s demontáží turbínového zařízení maximálně  | 40 dní  |
| 24. Počet provozního personálu (měrný)  | 0,35 pracovníků/MW  |
| 25. Palivo<br><br>Obohacení<br>Počet absorpčních tyčí   | UO <sub>2</sub> , obsahuje vyhořivací absorbátor gadolinium<br><br>4,79%<br>121 |
| 26. Maximální výpočtová hloubka vyhoření paliva, průměrná dle palivového souboru, pro režim stacionárních překládek paliva  | 60 MWd/kgU  |
| 27. Doba trvání kampaně paliva  | 4 roky  |
| 28. Perioda výměny paliva   | 12 měsíců   |
| 29. Hlavní parametry chladiva<br>Primární okruh: • teplota na vstupu do aktivní zóny  | 298,2 °C  |

|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• teplota na výstupu z aktivní zóny</li> <li>• průtok chladiva reaktorem</li> <li>• tlak na výstupu z reaktoru</li> </ul> <p>Sekundární okruh:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tlak páry na výstupu z PG</li> <li>• teplota páry na výstupu</li> <li>• parní výkon PG</li> <li>• teplota napájecí vody</li> <li>• vlhkost páry na výstupu z PG</li> </ul>   | <p>328,9 °C<br/>86000 m<sup>3</sup> /hod<br/>16,2 MPa</p> <p>7,0 MPa<br/>285,8 °C<br/>1602 t/hod<br/>225 °C<br/>&lt; 0,2 %</p> |
| <p>30. Dvojitý kontejnment</p> <p><u>Vnější ochranná železobetonová obálka (odolná proti pádu letadla-podle požadavků vojenského, nebo velkého civilního)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• průměr vnitřní</li> <li>• výšková kóta kupole</li> <li>• tloušťka (cylindrické části / kupole)</li> </ul> <p><u>Vnitřní hermetická železobetonová obálka s regulovatelným předpínáním</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• průměr vnitřní</li> <li>• výšková kóta kupole</li> <li>• tloušťka (cylindrické části / kupole)</li> <li>• výpočtový přetlak</li> <li>• výpočtová teplota</li> </ul> | <p>50,0 m<br/>70,2 m<br/>0,8/0,6 m</p> <p>44,0 m<br/>67,6 m<br/>1,2/1,0 m<br/>0,4 MPa<br/>150 °C</p>                           |
| <p>31. Turbosoustrojí</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• počet na výrobní blok</li> <li>• počet dílů turbíny (za předpokladu LMZ K-1200-6,8)</li> <li>• jmenovité otáčky</li> </ul>   | <p>1<br/>1 vysokotlaký + 4 nízkotlaké<br/>3000 ot. /min</p>  |
| <p>32. Havarijní systém čištění vzduchu meziobálkového prostoru od radioaktivních úniků zajišťuje čištění minimálně:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• elementární jód</li> <li>• organický jód</li> <li>• aerosoly</li> </ul>   | <p>99,9 %<br/>99 %<br/>99,99 %</p>   |
| <p>33. Celková pravděpodobnost</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• poškození aktivní zóny</li> <li>• převýšení kritérií mezního ovlivnění okolí při těžkých haváriích</li> <li>• celková četnost stavů s těžkým poškozením paliva a narušením hermetičnosti kontejnmentu</li> </ul>  | <p>&lt;5,8. 10<sup>-7</sup><br/>&lt;2,0.10<sup>-8</sup><br/>&lt;3.7.10<sup>-9</sup></p>  |

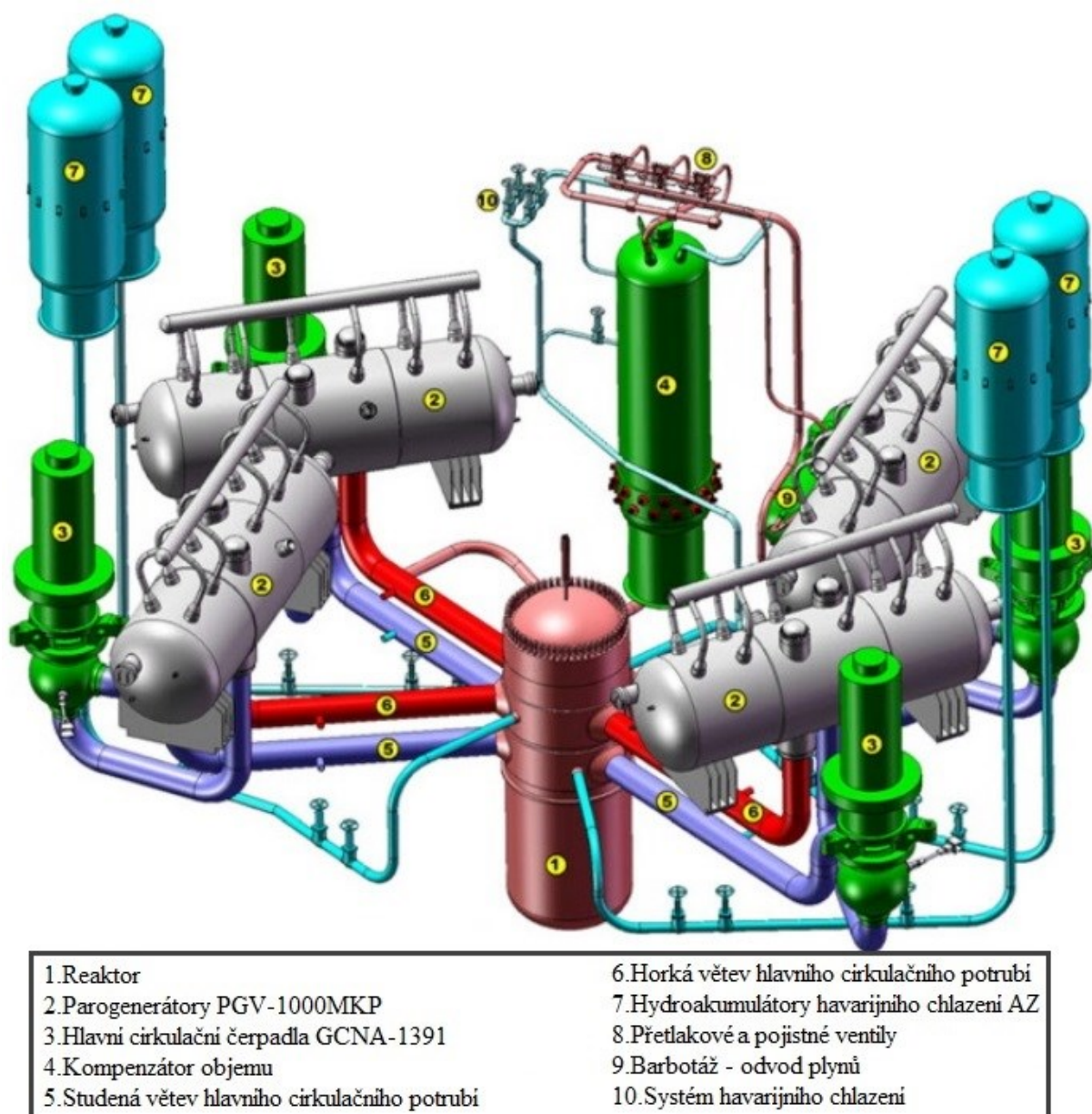
\*Parametry nutno upřesnit dle vybrané technologie turbínového ostrova

Tabulka 4.1: Základní technické charakteristiky energobloku VVER-1200 (AES-2006)  
[19,20]



## 4.1 Primární okruh

Blok VVER-1200 má obdobně jako blok starší generace VVER-1000 čtyřsmyčkovou koncepci primárního okruhu. Hlavní cirkulační potrubí má světlost DN 850. Síla stěny potrubí je 70 mm. Celková délka hlavního cirkulačního potrubí je 146 m a má životnost stejnou jako všechny základní díly bloku, 60 let. Hlavními částmi okruhu jsou jaderný reaktor VVER-1200/V-491, čtyři hlavní cirkulační čerpadla GCNA-1391, kompenzátor objemu a parogenerátory PGV-1000MKP. Čtyři hydroakumulátory havarijního chlazení jsou přes ventily napojeny potrubím přímo na reaktorovou nádobu. [26]



Obr. č. 4.1: Primární okruh VVER-1200 [9]



#### 4.1.1 Reaktor

Jaderné reaktory VVER-1200 jsou vylepšenými reaktory VVER-1000, vyvinuté v téže projekční společnosti OKB Hidropress. Byly provedeny konstrukční a materiálové úpravy, které dovolily, za zachování bezpečnostních požadavků, zvýšení tepelného výkonu reaktoru na 3212 MW. Důsledkem provedených úprav byl prodloužen palivový cyklus a tím zvětšena účinnost. Tlaková nádoba reaktoru z feritické oceli je z vnitřní strany opět chráněna vrstvou nerezové oceli, která má v oblasti aktivní zóny sílu 9 mm. U materiálu tlakové nádoby byl omezen obsah niklu na 1,3 %. Tím bylo pozitivně ovlivněno křehnutí materiálu za studena, a mohla být zvýšena projektová životnost na 60 let.

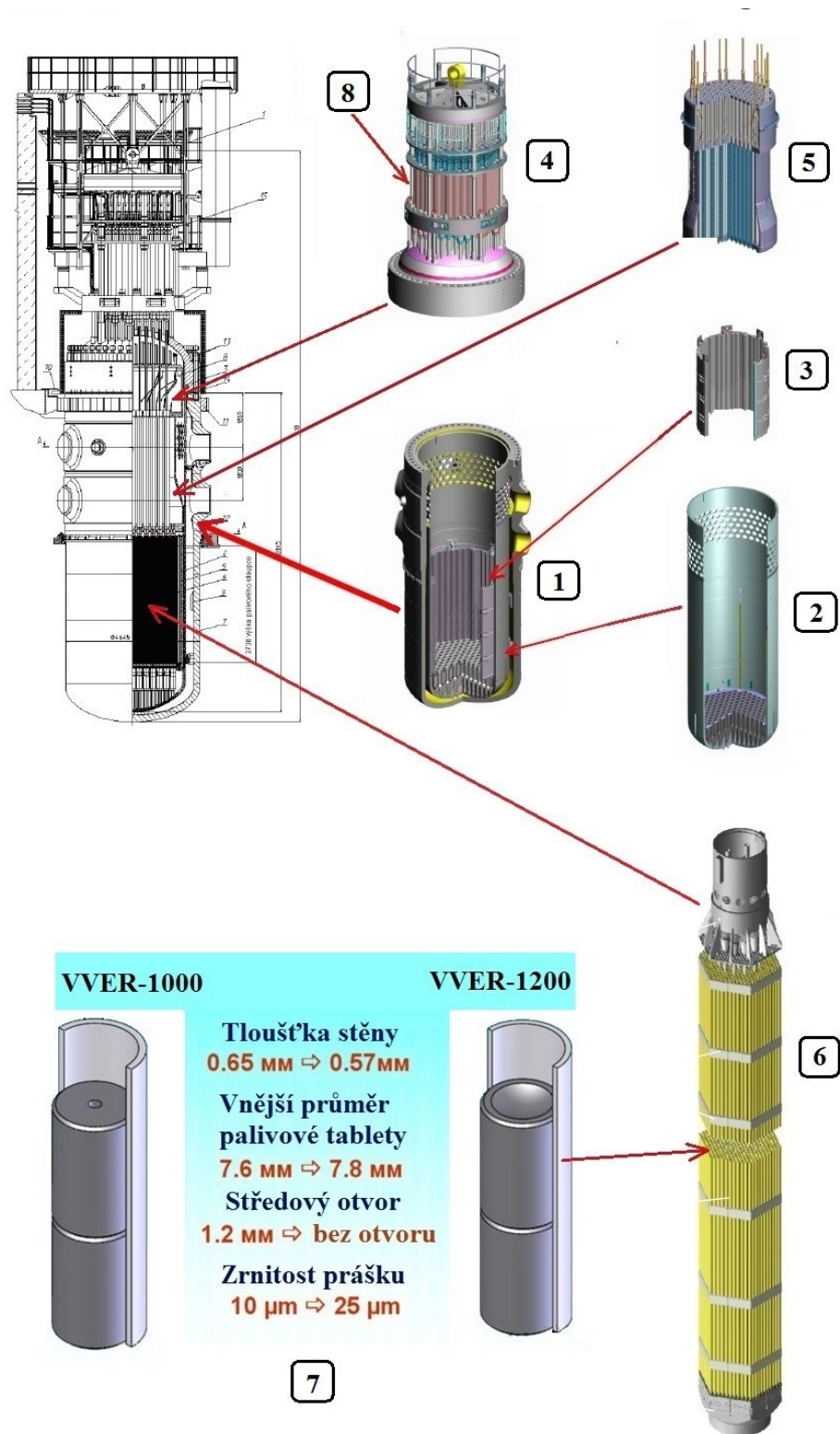
V aktivní zóně je oproti reaktorům VVER-1000/V320 zvýšen počet regulačních tyčí z 61 na 121, aby byl reaktor do budoucna připraven pro použití paliva MOX. [5,22,26]

##### Další rozdíly v reaktorech VVER-1000/V320 a reaktoru VVER-1200:

- Byly upraveny některé rozměry tlakové nádoby a dalších vnitřních částí.
- Bylo optimalizováno rozmístění svárů v oblasti aktivní zóny.
- Byly upraveny rozměry a design palivových tablet i zirkoniových tyčí.
- Byla o 200 mm prodloužena pracovní část palivového souboru, čímž se hmotnost oxidu uraničitého v jednom souboru zvětšila z 494 kg na 533 kg. Celkově se tak zvětšila hmotnost palivové vsázky.
- Svědečný materiál je rozmístěn do oblasti s největším neutronovým tokem. [5,22]

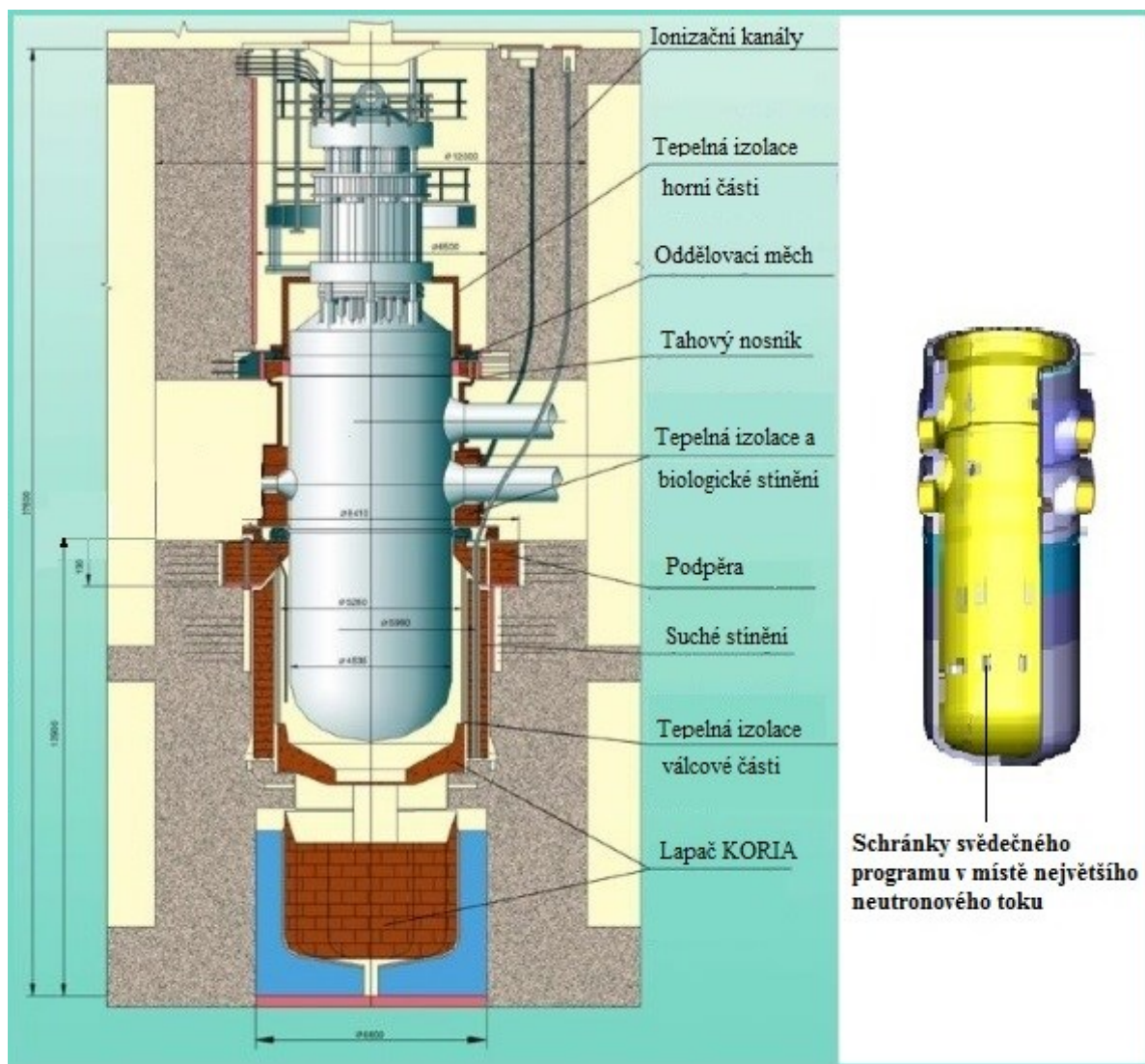
| POROVNÁNÍ REAKTORŮ VVER GENERACE II a III+ |                         |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|
| PARAMETR                                   | VVER-1000 /V320         | VVER-1200/ V-491        |
| Délka tlakové nádoby                       | 10897 mm                | 11185 mm                |
| Vnitřní průměr tlakové nádoby              | 4150 mm                 | 4250 mm                 |
| Tloušťka stěny aktivní zóny                | 192,5 mm                | 197,5 mm                |
| Hmotnost                                   | 320 t                   | 330 t                   |
| Teplota chladiva-výstup                    | 320 °C                  | 329 °C                  |
| Teplota chladiva-vstup                     | 290 °C                  | 298 °C                  |
| Průtok chladiva                            | 84800 m <sup>3</sup> /h | 86000 m <sup>3</sup> /h |
| Tlak na výstupu z reaktoru                 | 15,7 MPa                | 16,2 MPa                |

Tabulka 4.2: Porovnání reaktorů VVER [5]



- |                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1. Nádoba s šachtou a pláštěm | 5. Blok ochranných trub         |
| 2. Šachta                     | 6. Palivový soubor              |
| 3. Plášť                      | 7. Palivové proutky s tabletami |
| 4. Horní blok                 | 8. Pohony regulačních tyčí      |

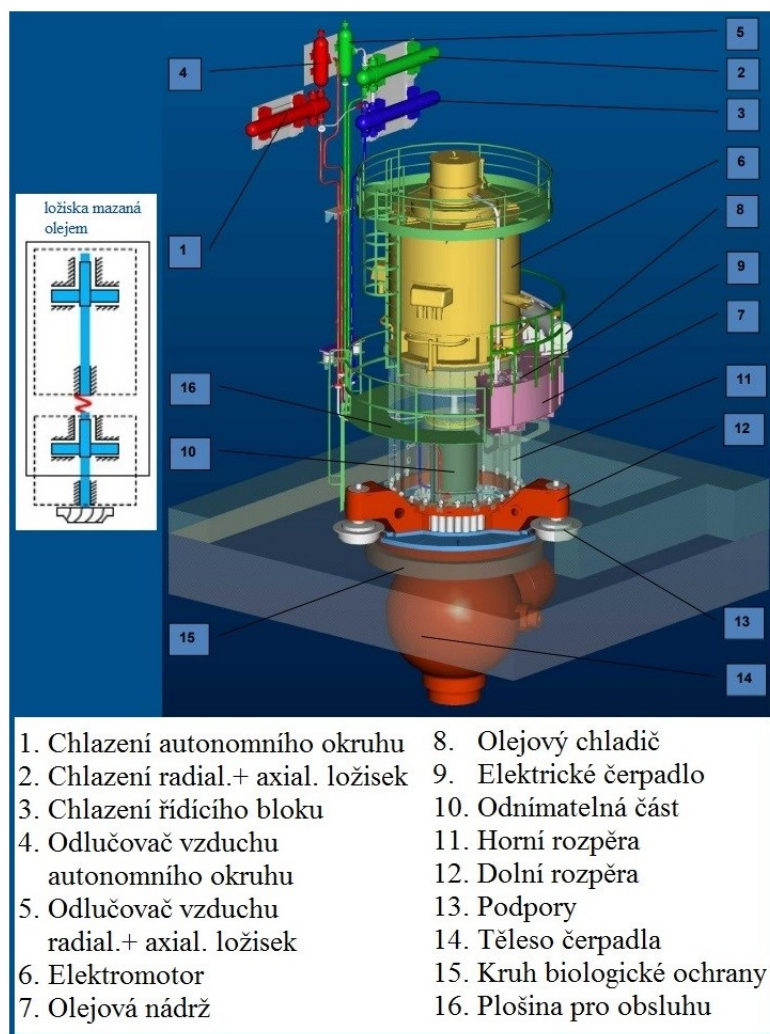
Obr. č. 4.2: Sestava jaderného reaktoru VVER-1200 [1,5,20,43]



Obr. č. 4.3: Umístění reaktoru VVER-1200 v šachtě [5,20]

#### 4.1.2 Hlavní cirkulační čerpadlo

Jednostupňové odstředivé čerpadlo s označením GCNA-1391, vycházející konstrukčně z čerpadla GCN-195M, které je osazeno v blocích VVER1000/V320, je vybaveno dvouotáčkovým, synchronním elektromotorem, pracujícím při jmenovitých otáčkách 1000/min. a s frekvencí 50 Hz. Rozběhové otáčky jsou 750 ot./min. Delší doběh čerpadla při výpadku napájení je zabezpečen setrvačником. Příkon elektromotoru při práci v horkém režimu je 5 MW, ve studeném režimu 6,8 MW. Je konstruováno na pracovní tlak média 16 MPa při teplotě 291 °C. Jmenovité dopravované množství média je 22 000 m<sup>3</sup>/h. Rotor čerpadla je uložen v jednom radiálním a jednom radiálně-axiálním ložisku. Rotor elektromotoru je uložen podobně. Horní tři ložiska jsou mazána nehořlavým olejem. Radiální ložisko nad oběžným kolem je mazáno vodou, čímž je eliminováno vniknutí oleje do primárního okruhu. Novější modely čerpadel jsou mazány vodou úplně. Hřídel čerpadla je proti úniku primárního média do prostoru kontejnmentu utěsněn mechanickou ucpávkou. Tělo čerpadla není vyrobeno litím, ale je kované v zápustce. [5,15,23,26]



Obr. č. 4.4: Hlavní cirkulační čerpadlo GCNA-1391 [1,5]

### 4.1.3 Parogenerátor

U bloků VVER jsou parogenerátory tradičně uloženy horizontálně, což se jeví výhodnější v případě havárie spojené s masivním únikem napájecí vody sekundárního okruhu. Horní část teplosměnných trubek zůstává v těchto případech déle zaplavená vodou a nesnižuje se účinnost chlazení reaktoru, jak tomu může být u vertikálních konstrukcí. Jako nevýhoda tohoto uspořádání se jeví větší prostorové nároky. U VVER-1200 jsou použity parogenerátory PGV-1000MKP s očekávanou životností 60 let. Oproti předchozím modelům PGV-1000M, osazeným také v Temelíně, je zde zvětšen vnitřní průměr. Vnitřní stěny válcové nádoby jsou pokryty nerezovou vrstvou jako ochranou před korozí. Chladivo z primárního okruhu prochází vstupním kolektorem a pak vstupuje do svazku trubek tvořících teplosměnnou plochu. Po předání tepla sekundárnímu okruhu voda pokračuje výstupním kolektorem do chladné smyčky primárního okruhu. Voda do sekundárního okruhu je přiváděna rozdělovacím kolektorem napájecí vody. Parogenerátor na sekundární straně produkuje sytou páru. Pára proudí ponořeným perforovaným plechem a v parním prostoru se suší vlivem gravitace. Pak pára vstupuje deseti sběrači páry do parního kolektoru nad ním, což je potrubí o průměru 630 mm. Teplosměnná plocha výměníku je tvořena 10 978 trubkami o průměru 16 x 1,5 mm z nerezové oceli. Trubky jsou zaústěny do vstupního a výstupního kolektoru primárního okruhu. V otvorech kolektorů jsou trubky rozválcovány a přivařeny. Celý svazek trubek je pro zajištění možnosti úplného odvodnění vyspádován. Parogenerátor je na svém místě fixován pomocí hydraulických tlumících prvků, čímž je zabezpečena jeho poloha a deklarovaná seizmická odolnost.

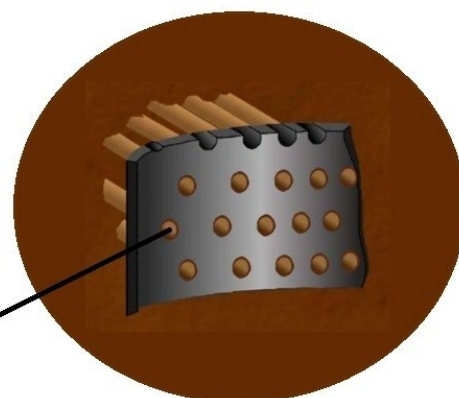
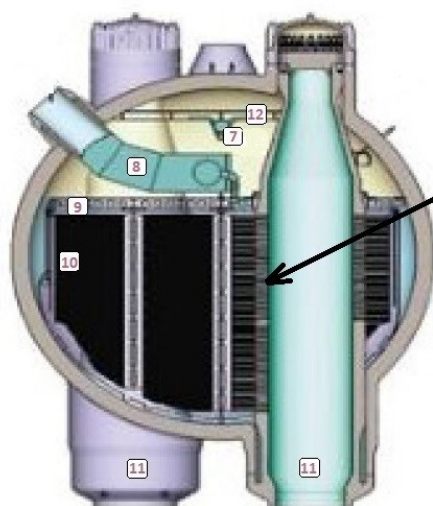
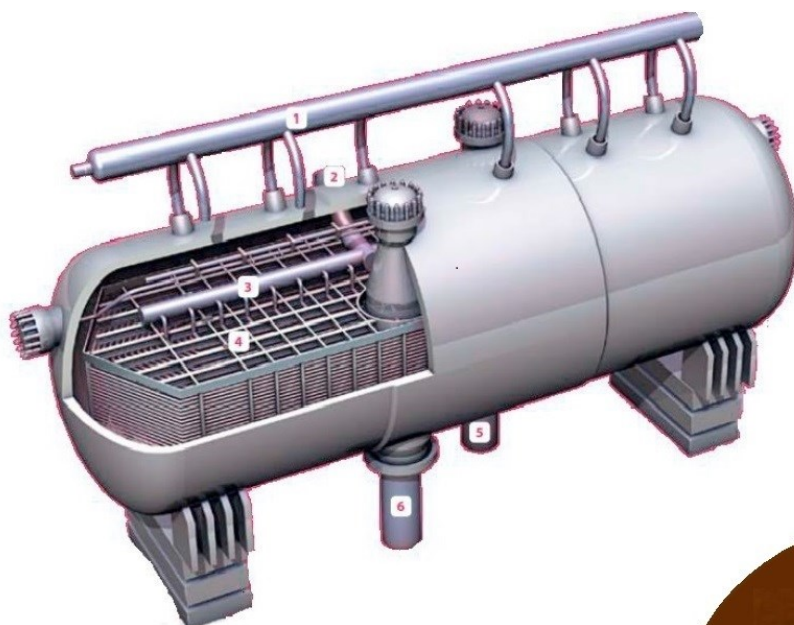
#### Některá další vylepšení parogenerátorů PGV-1000MKP:

- Instalace proplachovacího zařízení a další konstrukční úpravy umožňující snadnější odstraňování kalů ze spodní části parogenerátoru. Z toho důvodu byl zvětšen prostor pod svazkem trubek.
- Byla zvětšena rychlost proudění primární vody svazkem trubek.
- Byl ulehčen přístup k trubkovému svazku a vnitřnímu zařízení.
- Byla zvětšena intenzita stálého i periodického profukování. [5,15,26]

| PARAMETR                             | PGV-1000M           | PGV-1000MKP           |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Teplota napájecí vody                | 220°C               | 225°C                 |
| Objem vody v sekundárním okruhu      | 52 m <sup>3</sup>   | 63 m <sup>3</sup>     |
| Teplota páry na výstupu              | 278,5°C             | 285,8°C               |
| Tlak páry                            | 6,27 MPa            | 7 MPa                 |
| Množství vyrobené páry               | 1470 t/h            | 1602 t/h              |
| Vnitřní průměr tělesa parogenerátoru | 4,0 m               | 4,2 m                 |
| Rozměry trubek                       | 16 x 1,5 mm         | 16 x 1,5 mm           |
| Schéma rozmístění trubek             | koridorové          | prostřídané           |
| Teplosměnná plocha                   | 6036 m <sup>2</sup> | 6104,9 m <sup>2</sup> |

*Tabulka 4.3: Parametry parogenerátorů [5,20]*





Zaválcované a přivařené  
trubky v kolektorech

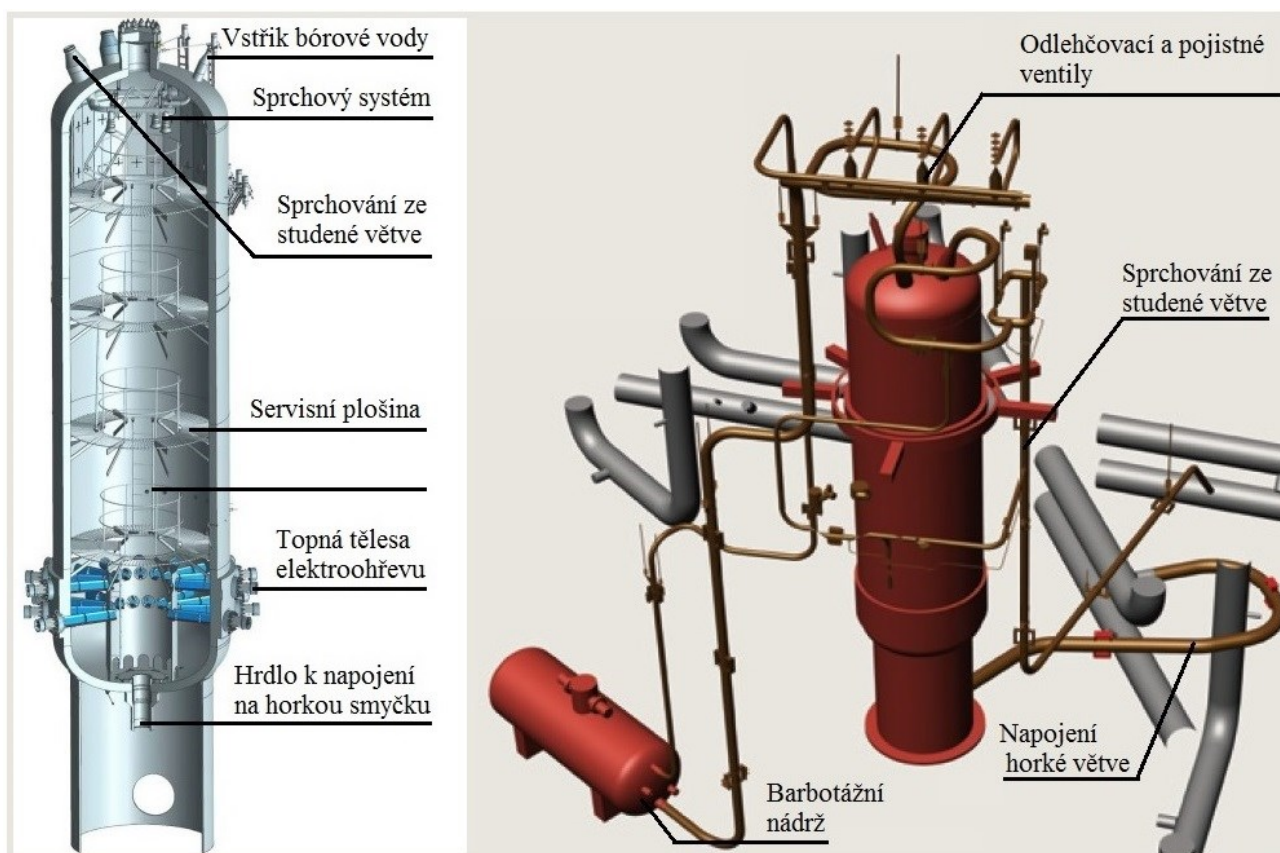
- |                           |                                 |
|---------------------------|---------------------------------|
| 1. Parní kolektor         | 7. Kolektor havarijní vody      |
| 2. Vstup napájecí vody    | 8. Přívod napájecí vody         |
| 3. Kolektor napájecí vody | 9. Ponořený děrovaný plech      |
| 4. Trubky výměníku        | 10. Trubky výměníku             |
| 5. Vstup chladiva         | 11. Kolektory primárního okruhu |
| 6. Výstup chladiva        | 12. Separátor páry              |

Obr. č. 4.5: Parogenerátor PGV-1000MKP [11,26]

#### 4.1.4 Kompenzátor objemu

Kompenzátor je vertikálně stojící tlaková nádoba o celkovém objemu  $79 \text{ m}^3$  a naplnitelná vodou do objemu  $55 \text{ m}^3$ . Je připojena k horké větvi hlavního cirkulačního potrubí. Slouží k udržování tlaku v primárním okruhu na konstantní úrovni. Tlak v systému je udržován parním polštářem nad hladinou primárního média. V případě potřeby zvýšení tlaku v primárním okruhu lze použít ohřev elektrickými topnými tělesy o celkovém výkonu  $2,52 \text{ MW}$ , umístěnými z boku v dolní části tlakové nádoby. V případě potřeby snížení tlaku je do parního polštáře přes sprchový systém rozstřikováváno médium ze studené větve, a tím dochází ke snižování tlaku v primárním okruhu. Pokud by účinek sprchového systému v daný okamžik nebyl dostatečný, jsou aktivovány odlehčovací nebo pojistné ventily nad kompenzátořem a přetlak páry je odveden do barbotážní nádrže, kde pára průchodem vodou kondenzuje.

Kompenzátor byl na blocích VVER-1200 vylepšen doplněním další linií regulovaného vstřiku z důvodu zkvalitnění regulace tlaku v přechodových stavech. [5,24]



Obr. č. 4.6: Kompenzátor objemu s příslušenstvím [5,11]



## 4.2 Sekundární okruh

Bloky VVER-1200 jsou nabízeny se dvěma typy turbín, přičemž potenciálních výrobců turboalternátorů nebo možných kombinací turbín a alternátorů je víc.

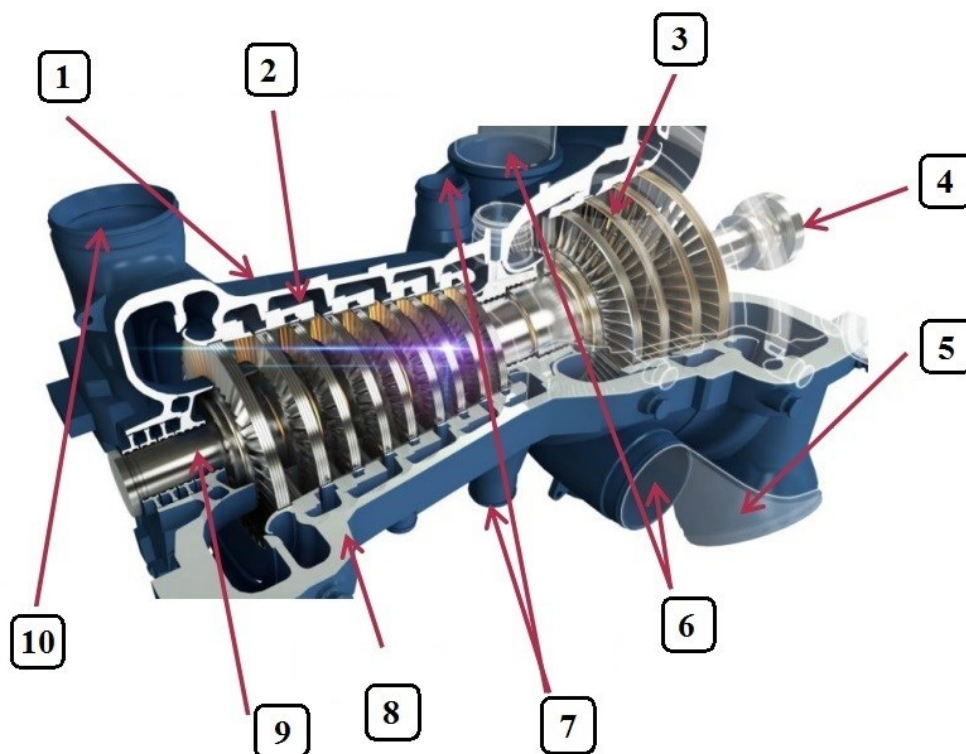
### 4.2.1 Turbína LMZ K-1200-6,8 / 50 s alternátorem TZW-1200-2UZ

Plnootáčková turbína LMZ K-1200-6,8 / 50 vyráběná ruským koncernem OJSC Power Machines obsahuje jednu vysokotlakou a čtyři nízkotlaké části. Zde se entalpie páry mění na mechanickou otáčivou energii turbíny. Turbína pak pohání třífázový elektrický alternátor o výkonu 1200MW při 3000 ot/min. a napětí 24kV. Po průchodu turbínou vyexpandovaná pára odchází do kondenzátorů, které jsou chlazeny cirkulující vodou. Odtud je kondenzát čerpán do úpravny kondenzátu. Poté kondenzát prochází první a druhou skupinou nízkotlakých ohřívačů do odplyňovacího zařízení, kde je působením páry z odběru turbíny odplyněn a předeřhát. Z odplyňovacího zařízení se pak napájecí voda napájecími čerpadly opět přivádí přes vysokotlaké ohřívače do parogenerátorů.

### 4.2.2 Turbína ARABELLE-1000

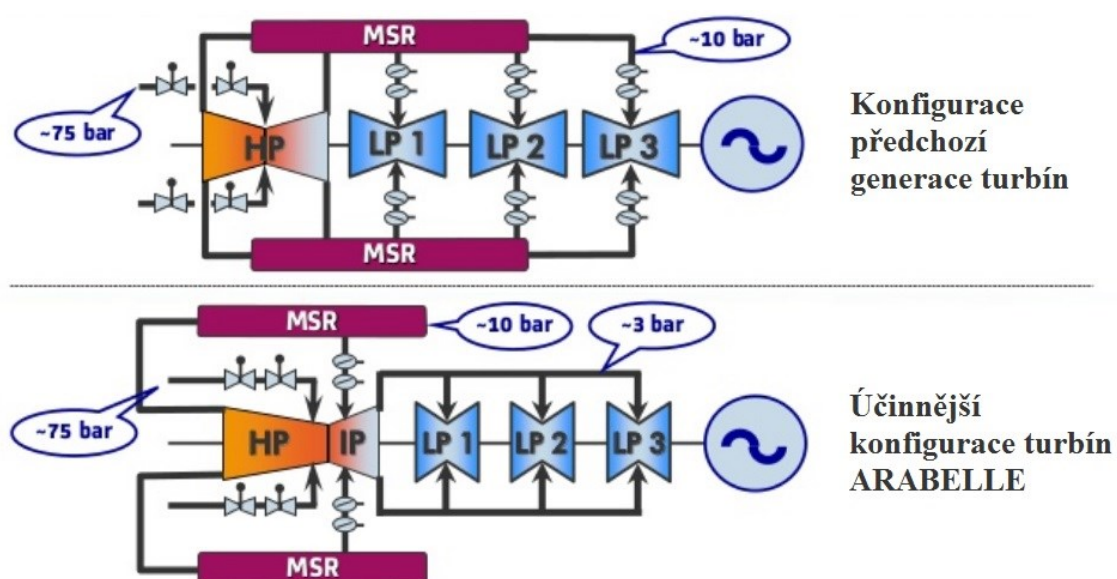
Polootáčková turbína s 1500 ot/min. ARABELLE-1000 je vyvinutá mezinárodním koncernem Alstom. Je tvořena jednou vysoko-středotlakou částí a dvěma nízkotlakými částmi. Pro turbíny ARABELLE je charakteristické uspořádání vysoko-středotlaké části, viz obr. 4.7. Pára po expanzi ve vysokotlaké části nepřechází do středotlaké části v jednom směru středem turbíny, ale je do středotlaké části přivedena vnějším potrubím až po přihřátí. K přeměně entalpie páry na mechanickou otáčivou energii tak dochází s větší účinností. Účinnost této turbíny je přibližně o 5% vyšší než LMZ K-1200-6,8 / 50. Jako alternátor do tohoto turbosoustrojí lze mimo jiných alternátorů použít čtyřpólový GIGATOP-4 o elektrickém výkonu 1270 MW, který pochází taktéž z koncernu Alstom.

Soustrojí LMZ K-1200-6,8 nevyžaduje tak vysokou budovu strojovny, zato musí být strojovna delší. Turbína ARABELLE -1000 je celkově kratší, ale strojovnu je třeba vyšší. Zřejmě i vibrace a citlivost na nevyvahu bude u pomaluběžných turbín menší. [25,34,40]



- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| 1. Těleso vysoko-středotlaké části turbíny      | 6. Vstup páry do středotlaké části  |
| 2. Statorová část turbíny                       | 7. Vstup páry do vysokotlaké části  |
| 3. Rotorové listy středotlaké části             | 8. Dělicí rovina                    |
| 4. Spojka mezi nízkotlakou a středotlakou částí | 9. Monoblok vysokotlakého rotoru    |
| 5. Výstup páry ze středotlaké části             | 10. Výstup páry z vysokotlaké části |

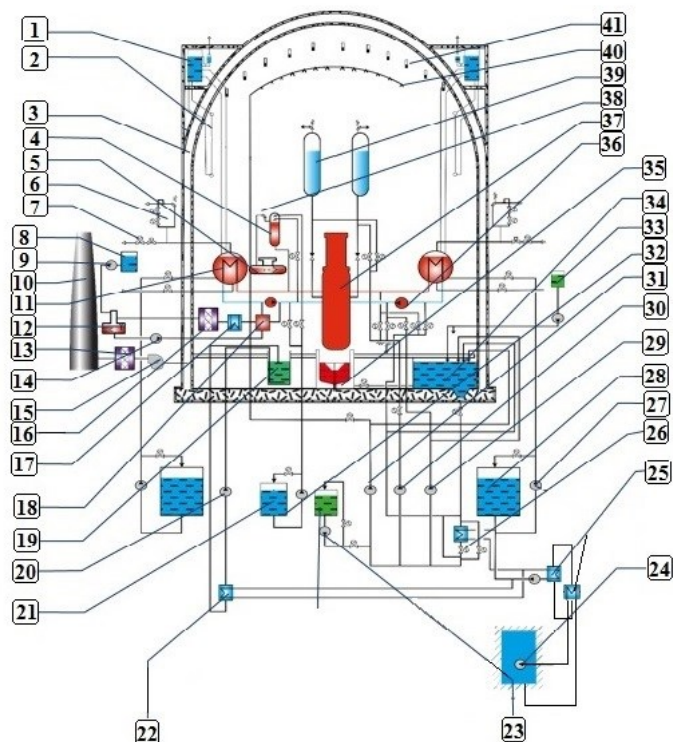
Obr. č. 4.7: Vysoko-středotlaký díl turbíny ARABELLE -1000 zdroj [34]



Obr. č. 4.8: Porovnání konfigurací turbín zdroj [34]

### 4.3 Bezpečnostní systémy VVER-1200

U bloků VVER-1200 není třeba do 30 minut po havárii zásah operátora. Všechny systémy, které jsou určeny k řízení vážné projektové havárie, umožňují udržet bezpečný stav primárního okruhu po dobu prvních 24 hodin. [20]



- |  |   |
|--|---|
| 1. Nádrž havarijního odvodu tepla SPOT-PG              | 22. Výměník chlazení bazénu vyhořelého paliva       |
| 2. Tepelné výměníky SPOT-ZO                            | 23. Čerpadlo přívodu chemických reagentů            |
| 3. Kontejnment   | 24. Bazén s rozstříkem                              |
| 4. Kompenzátor objemu                                  | 25. Výměníky meziokruhu                             |
| 5. Barbotážní nádrž                                    | 26. Výměník havarijního čerpadla                    |
| 6. Hlavní blok parních armatur                         | 27. Havarijní napájecí čerpadlo                     |
| 7. Parovod   | 28. Nádrž zásoby kyseliny borité vysoké koncentrace |
| 8. Nádrž organizovaných úniků                          | 29. Vysokotlaké havarijní čerpadlo                  |
| 9. Čerpadlo organizovaných úniků                       | 30. Nízkotlaké havarijní čerpadlo                   |
| 10. Větrací komín                                      | 31. Čerpadlo sprchovacího systému                   |
| 11. Parogenerátor                                      | 32. Čerpadlo bórové vody                            |
| 12. Odplyňovák systému doplňování primárního okruhu    | 33. Nádrž havarijní zásoby alkálií                  |
| 13. Filtér   | 34. Jímka bórové vody nízká koncentrace             |
| 14. Čerpadlo systému doplňování primárního okruhu      | 35. Lapač koria                                     |
| 15. Ventilátor tvorby podtlaku                         | 36. Havarijní cirkulační čerpadlo                   |
| 16. Speciální úprava vody                              | 37. Reaktor   |
| 17. Dochlazovač  | 38. Pojistné a přetlakové ventily                   |
| 18. Regenerační výměník k proplachu systému doplňování | 39. Hydroakumulátory havarijního chlazení AZ        |
| 19. Bazén skladování vyhořelého paliva                 | 40. Kolektor sprchových systémů                     |
| 20. Čerpadlo havarijního přívodu bóru                  | 41. Pasivní rekombinátory vodíku                    |
| 21. Nádrž zásoby s roztokem kyseliny borité            |   |

Obr. č. 4.9: Schéma primární částí bloku VVER-1200 a bezpečnostních systémů [11,43]

### 4.3.1 Systémy havarijního chlazení aktivní zóny

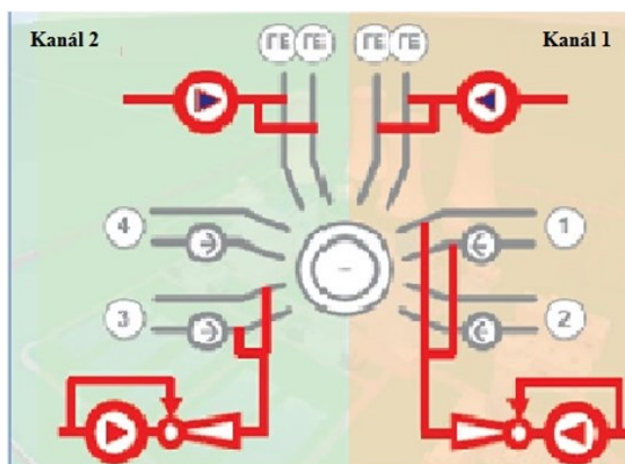
Tyto systémy jsou určeny k zajištění dostatku média v aktivní zóně a primárním okruhu v případech jeho netěsnosti a k zabezpečení odvodu tepla z aktivní zóny.

#### 4.3.1.1 Aktivní část systémů havarijního chlazení

##### Havarijní vysokotlaké a nízkotlaké vstřikování – dvoukanálová modifikace

Systém je tvořen ze dvou stejných a na sobě nezávislých kanálů a má redundanci 2 x 100 %. Jeden kanál obsahuje vždy dvě vysokotlaká a nízkotlaká čerpadla, jimiž v případě potřeby může být do primárního okruhu dopravována voda s koncentrací 16 g/kg kyseliny borité. Na výtlačných potrubích vysokotlakých čerpadel jsou instalovány ejektory s trojcestnými ventily a dále je systém napojen na hlavní cirkulační potrubí. Výtlačná potrubí nízkotlakých čerpadel jsou propojena s potrubím od hydroakumulátorů havarijního chlazení. Při menších netěsnostech primárního okruhu a poruše vysokotlakých čerpadel jsou tato zálohována nízkotlakými čerpadly s tím, že je teplo z aktivní zóny odváděno přes sekundární okruh prostřednictvím systému SPOT.

Při masivních únicích z primárního okruhu a výpadku všech nízkotlakých čerpadel jsou tato zálohována čerpadly vysokotlakými, kdy dostatečné množství dodávaného roztoku kyseliny borité je řešeno pomocí ejektorů. Systém je určen pro VVER-1200/V-392M. [5]

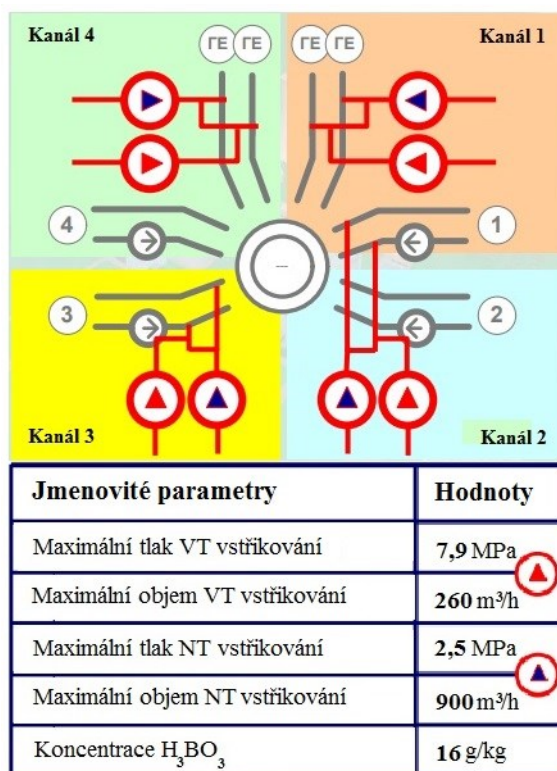


Obr. č. 4.10: Dvoukanálová modifikace havarijního vstřikování [1]



## Havarijní vysokotlaké a nízkotlaké vstřikování – čtyřkanálová modifikace

System je určen k dopravě roztoku kyseliny borité vysokotlakými a nízkotlakými čerpadly do vody primárního okruhu v případě projektových havárií spojených se ztrátou primárního média v širokém spektru nehod až do prasknutí jedné smyčky primárního okruhu DN 850. Voda je čerpána z jímky s nízko-koncentrovaným roztokem kyseliny borité. System je rozdělen na čtyři nezávislé kanály a má redundanci 4 x 100 %. Je určen pro VVER-1200/V-491. [5]

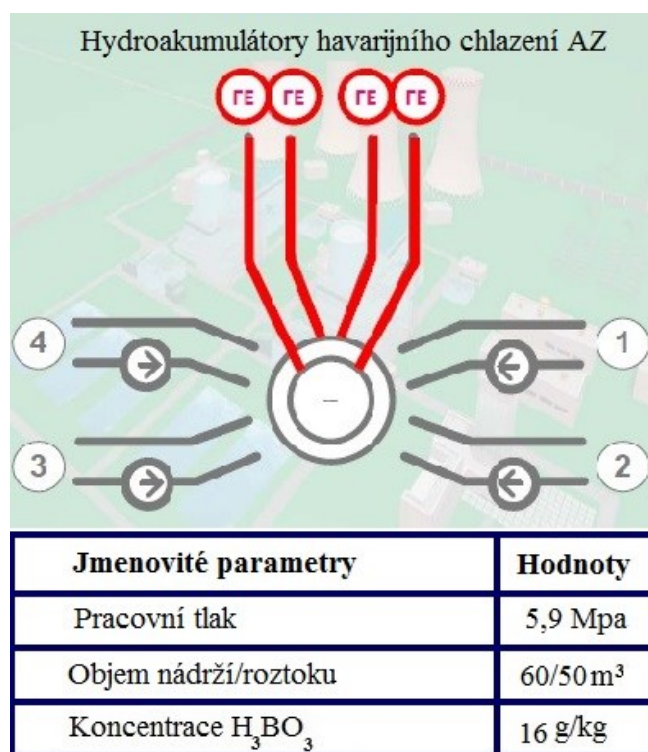


Obr. č 4.11: Čtyřkanálová modifikace havarijního vstřikování [5]

### 4.3.1.2 Pasivní část systémů havarijního chlazení

#### Vysokotlaké zaplavení aktivní zóny

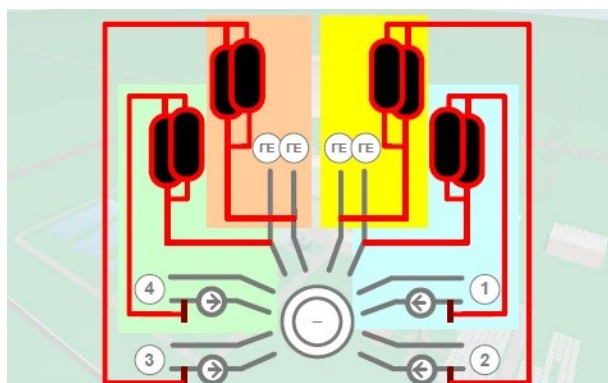
Je rozděleno na čtyři identické a na sobě nezávislé kanály. V případě havárie, spojené s masivním únikem primárního média, vstřikuje při poklesu tlaku v primárním okruhu na hodnotu nižší než 5,9 MPa přímo do aktivní zóny reaktoru roztok kyseliny borité z hydroakumulátorů havarijního chlazení do doby, než jsou aktivována nízkotlaká čerpadla. Roztok bývá přehřát na 50-70 °C. System je použit u všech VVER-1200. [5]



Obr. č. 4.12: Vysokotlaké zaplavení AZ [5]

#### Nízkotlaké zaplavení aktivní zóny

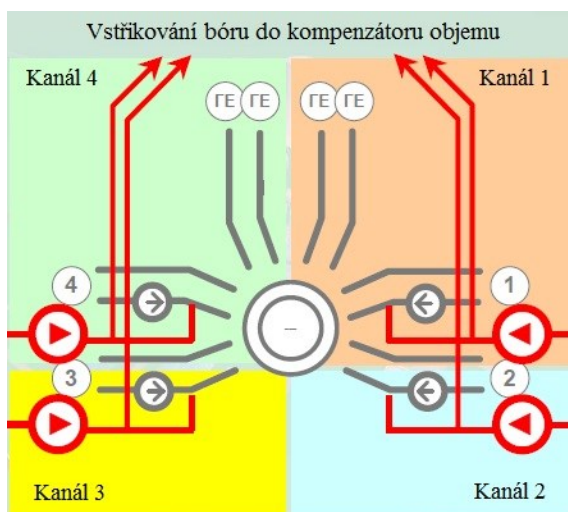
Systém zabraňuje minimálně po dobu 24 hodin rozvoji vážných událostí v případech výpadku aktivní části systému havarijního chlazení, včetně dieselaagregátů, nebo v případě blackoutu. Je rozdělen na čtyři nezávislé kanály a má redundanci 4 x 33 %. Každý z kanálů je tvořen dvěma hydroakumulátory napojenými na smyčky primárního okruhu. Takto je možné okruh doplňovat. Celková zásoba vody s obsahem kyseliny borité 16 g/kg v nich je 120 m<sup>3</sup>. Systém není použit u VVER-1200/V-491, u verze V-392M aplikován je. [5]



Obr. č. 4.13: Nízkotlaké zaplavení AZ [1]

### 4.3.2 Havarijní vstřikování bóru

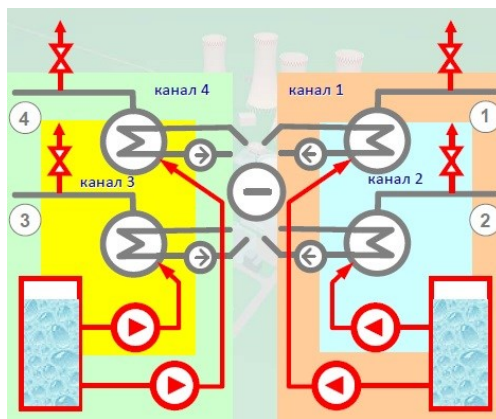
Systém je rozčleněn na čtyři kanály a je určen ke vstřikování roztoku kyseliny borité s koncentrací 40 g/kg (u V-491) do kompenzátoru objemu v případě netěsnosti, způsobující pronikání primárního média do sekundárního okruhu, kdy je třeba tlak v tomto okruhu snížit. Tímto systémem lze také reaktor uvést do podkritického stavu v případě, že by selhal systém havarijního odstavení reaktoru. Voda s kyselinou boritou je u verze V-491 čerpána ze dvou nádrží, z nichž každá disponuje objemem  $150\text{ m}^3$ . U verze V-392M je voda s koncentrací kyseliny borité 16 g/kg pro tento systém čerpána z bazénu skladování vyhořelého paliva. [5]



Obr. č. 4.14: Havarijní vstřikování bóru [5]

### 4.3.3 Dodávka havarijní napájecí vody

Systém použitý u verze V-491 je členěn na čtyři nezávislé kanály a je určen k zabezpečení dostatku napájecí vody pro parogenerátory v případech, kdy dodávka z hlavního ani pomocného systému není možná. Voda z nádrží o objemech  $700\text{ m}^3$  je čerpána do přímo do parogenerátorů. Systém je vybaven přetlakovými ventily, kterými je možno vyrobenou páru odpouštět do atmosféry. Takto je zabezpečeno chlazení aktivní zóny přes sekundární okruh. [5]



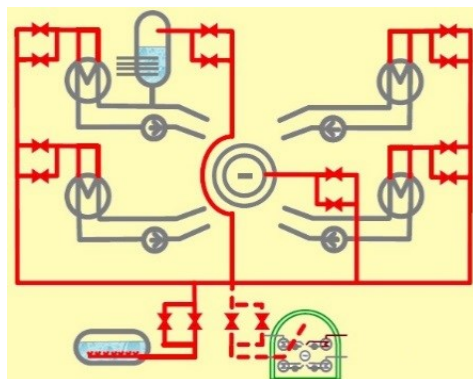
Obr. č. 4.15: Dodávka havarijní napájecí vody [5]

#### 4.3.4 Nouzové chlazení parogenerátoru

Systém je použitý u verze V-392M a je alternativou k výše popsanému systému dodávky havarijní napájecí vody aplikovanému u V-491, kde dochází k velkým ztrátám vody z důvodu vypouštění páry do atmosféry. Při nouzovém chlazení parogenerátoru proudí medium uzavřeným sekundárním okruhem ve smyčce přes výměník. Teplo je meziokruhem předávané do dalšího výměníku, jehož sekundární strana je následně chlazena vodou z venkovního bazénu s rozstřikem. Pasivní alternativou tohoto systému je systém pasivního odvodu tepla SPOT.

#### 4.3.5 Nouzový odvod plynů

Systém je navrhnut pro případy nadprojektových havárií a určen k odvodu paroplynové směsi vznikající varem primárního média, směsi shromažďující se pod víkem reaktoru, v kompenzátoru objemu, v kolektorech parogenerátorů. Připouští se používání tohoto systému i za běžného provozu nebo poruch. [5]



Obr. č. 4.16: Nouzový odvod plynů [5]

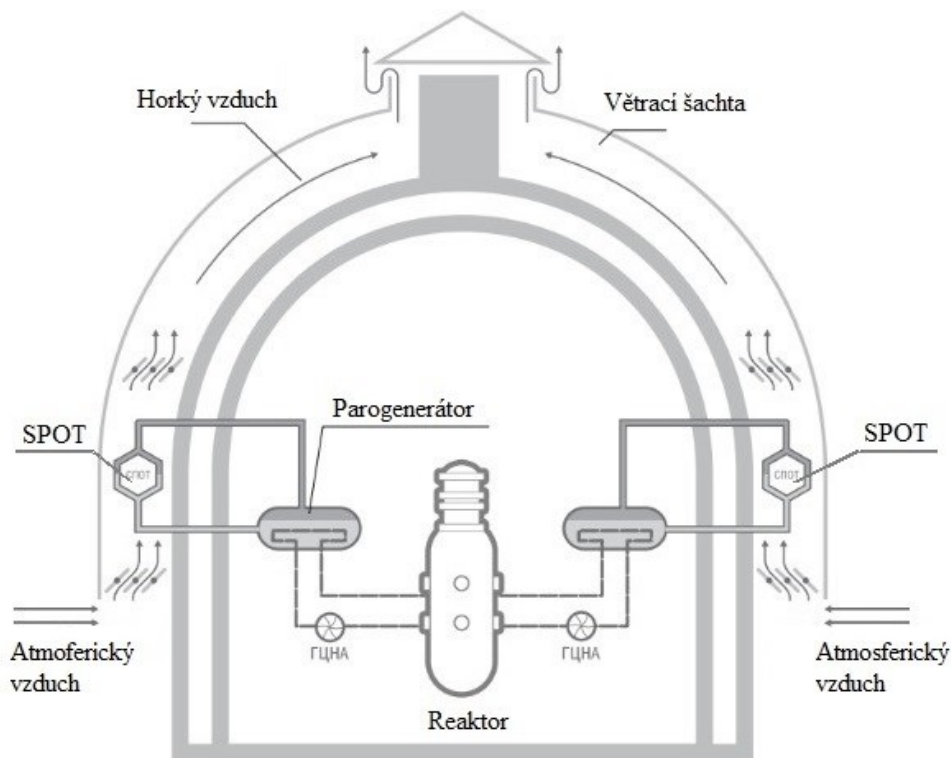


### 4.3.6 Systémy pasivního odvodu tepla z obálky a z parogenerátoru

#### 4.3.6.1 SPOT

U jaderných bloků VVER-1200/V-392M je využíván systém pasivního odvodu tepla SPOT.

Je tvořen čtyřmi tepelnými výměníky umístěnými z vnější strany kontejnmentu. Jako chladicí médium je využíván okolní vzduch, který pomocí komínového efektu přirozeně proudí výměníky a následně větracími šachtami. Systém je automaticky aktivován, jakmile tlak syté páry překročí hodnotu 7,25 MPa, nebo po 30 sekundách, pokud dojde k výpadku veškerého elektrického napájení. V případě aktivace jsou přes armatury propojeny parogenerátory s výměníky tak, že tvoří uzavřené okruhy, kterými přirozeně cirkuluje sekundární parovodní směs. Systém je schopen dlouhodobě odvádět zbytkové teplo z odstaveného reaktoru i při výpadku cirkulačních čerpadel, kdy je teplo z aktivní zóny do parogenerátorů předáváno přirozeným prouděním primárního média. Regulaci množství odváděného tepla lze provádět klapkami, umístěnými pod a nad výměníky. Účinnost systému závisí na okolních teplotách, které se mohou pohybovat v rozpětí  $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Redundance systému je 4 x 33 %. [44]



Obr. č. 4.17: Systém pasivního odvodu tepla SPOT [44]

#### **4.3.6.2 SPOT-PG a SPOT-ZO**

U bloků VVER-1200/V-491 je pasivní systém SPOT tvořen subsystémy SPOT-PG a SPOT-ZO. Tyto mohou zabránit vzniku nadprojektové havárie.

##### **SPOT-PG**

Systém pasivního odvodu tepla přes parogenerátory SPOT-PG je navrhnut pro odvod zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny již odstaveného reaktoru u havárií se znemožněným nebo omezeným odvodem tepla ze sekundárního okruhu. Mezi tyto havárie lze počítat například prasknutí parního potrubí nebo napájecího potrubí parogenerátoru. Dále je také určen pro případy havárií spojených s netěsnostmi nebo prasknutím primárního potrubí, včetně pronikání primárního média do sekundárního okruhu přes poškozený výměník parogenerátoru.

V případě automatické aktivace systému SPOT-PG, která se děje 30 sekund po výpadku veškerého elektrického napájení, je teplo z aktivní zóny přirozenou cirkulací přiváděno do parogenerátoru, a dále odváděno přes jeho teplosměnné plochy do parovodní směsi sekundárního okruhu. Tato směs, po otevření příslušných uzavíracích armatur, vlivem přirozené cirkulace odchází do výměníků ponořených v nádržích havarijního odvodu tepla, umístěných z vnější strany kontejnmentu v jeho horní části. Sekundární strana parogenerátoru tak tvoří s ponořeným výměníkem uzavřený okruh. Parovodní směs zkondenzovaná ve výměnících pak kondenzačním potrubím opět plní sekundární stranu parogenerátoru.

Systém je plně nezávislý na obsluze i elektrickém napájení, a k jeho činnosti tedy nemusí být provozuschopné ani záložní dieselaagregáty. Při použití tří ze čtyř okruhů může systém bez zásahu pracovat 24 hodin. Redundance SPOT-PG je 4 x 33 %. [20,26,43]

##### **SPOT-ZO**

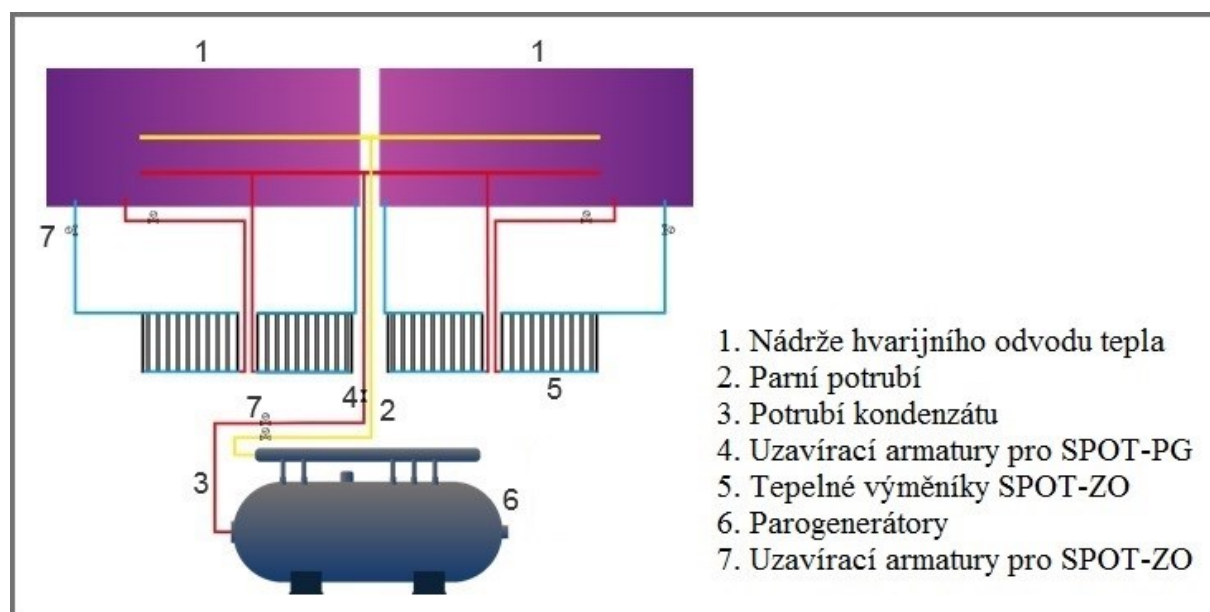
Systém pasivního odvodu tepla z obálky SPOT-ZO byl vyvinut pro použití u havárií se značným vývinem tepla a páry, tedy při haváriích spojených s únikem chladícího média primárního nebo sekundárního okruhu, kdy uvnitř obálky kontejnmentu stoupá teplota a tlak.

Systém je tvořen čtyřmi nezávislými skupinami, kdy každá skupina obsahuje čtyři výměníky. Ty jsou umístěny uvnitř obálky v jeho horní části. Přes uzavírací ventily jsou tyto výměníky propojeny potrubím s nádrží havarijního odvodu tepla umístěné z vnější strany

kontejnmentu a zaplněny vodou. Otevřením příslušných armatur je systém SPOT-ZO aktivován a pára v horní části kontejnmentu kondenzuje na výměnících.

Kondenzační teplo je předáváno vodě přirozeně cirkulující mezi nádržími havarijního odvodu tepla a výměníky.

Na rozdíl od systému SPOT instalovaných u bloků verze V-392M nelze systémy SPOT-ZO a SPOT-PG dlouhodobě provozovat bez doplňování vody do nádrží havarijního odvodu tepla. Bez doplnění vody je funkce systémů zaručena po dobu 24 hodin. [20,26,43]



Obr. č. 4.18: SPOT-PG a SPOT-ZO [43]

#### 4.3.7 Lapač koria

Bezpečnostním zařízením, kterými jsou vybaveny jaderné elektrárny s bloky VVER-1200 generace III+ je lapač roztavené aktivní zóny. Lapač koria byl poprvé instalován v elektrárně Tianwan v Číně roku 2007. Je mimo jiné také nainstalován na referenčních blocích generace III+ v ruských elektrárnách Leningradská II a Novovoronežská II.

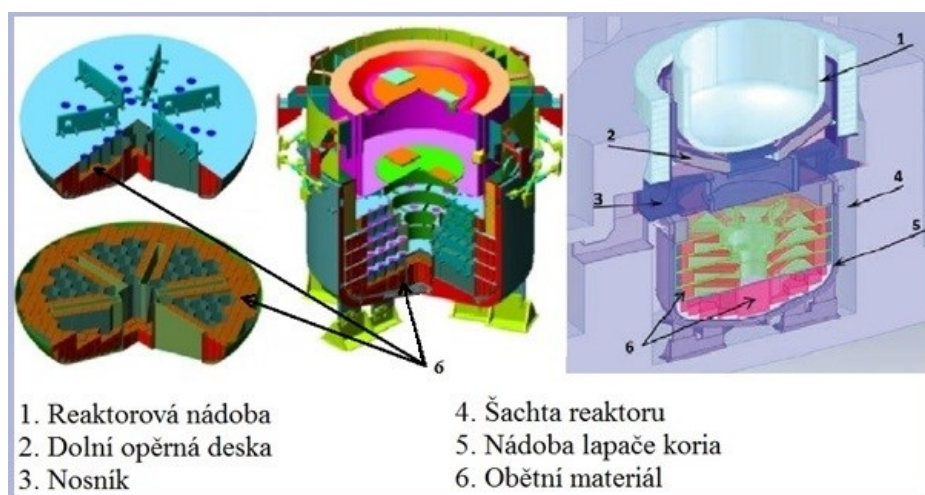
Jde o více než 800 t těžké zařízení, které je u bloků VVER-1200 umístěno v šachtě pod reaktorem. Je to zařízení, které by v případě velmi nepravděpodobné havárie spojené s tavením aktivní zóny a následným průnikem taveniny stěnou reaktoru, zabránilo interakci radioaktivních zbytků aktivní zóny s betonovou šachtou pod reaktorem a jejímu vniknutí do podloží mimo obálku a kontaminaci okolního prostředí a spodních vod. [16,20]

### Konstrukce lapače:

Těleso lapače je tvořeno ocelovou nádobou s dvěma stěnami. Vnější stěna je široká 60 mm, vnitřní 30 mm. Prostor mezi nimi je vyplněn materiálem stabilním ve vysokých teplotách. Lapač taveniny je vyplněn kazetami s obětním materiálem, jehož základem je oxid železitý a oxid hlinitý, dále obsahuje malé množství oxidů gadolinia a křemíku. Obětní materiál se s taveninou smísí a usnadňuje chlazení.

### Funkce lapače taveniny:

- Zabraňuje úniku taveniny mimo toto zařízení, zabraňuje jejímu kontaktu s betonovým základem a proniknutí pod kontejnment
- Zabraňuje případnému úplnému odtržení dna reaktorové nádoby využitím podpěrného nosníku
- Absorbuje teplo a zajišťuje pod-kritičnost taveniny, tudíž jaderné palivo se zbytky součástí tvořících aktivní zónu je v lapači uchováváno v podmínkách, kdy není možná řetězová reakce
- Zajišťuje stabilní tepelnou výměnu mezi chladicí vodou a taveninou
- V případě kontaktu taveniny s chladicí bórovou vodou a vodou z chladicích a sprchových systémů jsou vytvářeny radioaktivní plynné produkty a vodík. Lapač tvorbu těchto plynů také vlivem složení obětního materiálu omezuje.
- Minimalizuje pronikání radioaktivních látek do oblasti kontejnmentu [16,20,26]



Obr. č. 4.19: Lapač taveniny aktivní zóny [16,26]

#### 4.3.8 Systém odstraňování vodíku

Při těžkých haváriích spojených s tavením aktivní zóny dochází k vývinu vodíku, mimo jiné taky vlivem reakce tavících se zirkoniem pokrytých palivových proutků a chladicího média.

Systém je tvořen pasivními autokatalytickými vodíkovými rekombinátory, rozmístěnými v kontejnmentu, a přístrojovým vybavením pro jejich monitorování a testování.

V autokatalytických rekombinátorech je za pomoci katalyzátoru exotermně vodík slučován s kyslíkem za vzniku vodní páry.

Funkce systému odstraňování vodíku z atmosféry kontejnmentu:

- Při projektových haváriích udržuje koncentraci vodíku ve směsi se vzduchem a vodní párou pod koncentračními limity nutnými k šíření plamene, a to ve vypočteném rozmezí změn parametrů prostředí v prostorách kontejnmentu.
- Při nadprojektových haváriích udržuje koncentraci vodíku v mezích vylučujících detonaci a rozvoj rychlého hoření ve velkých objemech úměrných rozměrům základních úseků kontejnmentu. [11]



*Obr. č. 4.20: Autokatalytické rekombinátory [20]*

#### 4.3.9 Kontejnment

Bloky VVER-1200 jsou standardně vybaveny dvojitými kontejnmenty.

Funkcí ochranné obálky reaktoru je zabránit úniku radioaktivních látek z reaktorové budovy do životního prostředí, a to za všech okolností.

Vnitřní obálka je vyrobena z předepjatého betonu, s vnitřním průměrem 44 m, výškou 67,6 m a silou stěny 1200 mm. Je konstruována tak, aby předepínací systém byl stavitelný a opravitelný. Uvnitř je obložena ocelovými plechy o síle 6 mm. Spoje mezi jednotlivými plechy jsou hermeticky utěsněny svařením. Kontejnment je navržen na maximální vnitřní přetlak 0,4 MPa a teplotu 150°C.

Vnější obálka je vyrobena taktéž z vyztuženého betonu. Celkový vnitřní průměr vnější obálky je 50 m a výška 70,2 m. Všechna potrubí procházející skrz stěny obálek jsou vybavena lokalizačními ventily, jimiž lze oddělit vnitřní prostředí kontejnmentu od okolí, kabeláž je vyvedena pomocí hermetických průchodek.

Při návrhu kontejnmentu bylo zohledněno možné působení vnějších vlivů jako jsou:

- Pád dopravního letadla – uvažován Boeing 747-440.
- Zemětřesení – odolnost proti bočnímu zrychlení 0,35 g.
- Povodně.
- Vnější exploze.
- Hurikány, tornáda-komponenty elektrárny související s bezpečností jsou navrženy na zatížení větrem o rychlosti 30 m/s v desetimetrové výšce.
- Zatížení sněhem. [26]

## 5. Výpočtová část

### Zadání

Proveďte tepelný výpočet horizontálního trubkového výměníku tepla

voda / pára ve čtyřsmyčkovém uspořádání I. okruhu dle zadaných parametrů:

|                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| Tepelný výkon výměníku    | $Q = 800 [MW]$                     |
| Parní výkon výměníku      | $G = 1600 [t \cdot h^{-1}]$        |
| Tlak syté páry            | $P_2 = 7 [MPa]$                    |
| Teplota napájecí vody     | $t_{nv} = t_2'' = 225 [^{\circ}C]$ |
| Počet cirkulačních smyček | 4 [–]                              |
| Odluh                     | 1 [%]                              |

Z dostupných materiálů [26] jsou použity následující parametry výměníku:

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Tlak vody v primární části výměníku                | $P_1 = 16.2 [MPa]$                   |
| Teplota vody vstupující do primární části výměníku | $t_1' = 328,9 [^{\circ}C]$           |
| Teplota vody vystupující z primární části výměníku | $t_1'' = 298,2 [^{\circ}C]$          |
| Objemový průtok chladicí vody reaktorem            | $\dot{V} = 86000 [m^3 \cdot h^{-1}]$ |

### Výpočet střední teploty teplotonosné látky v primárním okruhu

Střední teplotu vody v primárním okruhu lze vypočítat aritmetickým průměrem teplot vody vstupující a vystupující z výměníku:

$$t_{v,st} = \frac{t_1' + t_1''}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

$$t_{v,st} = \frac{328,9 + 298,2}{2} = 313,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### **Určení tepelné charakteristiky teplotnosné látky v primárním okruhu při vypočtené střední teplotě**

Z termodynamických tabulek [14] byly získány následující hodnoty:

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Hustota                      | $\rho = 682,6 \text{ [kg.m}^3\text{]}$                        |
| Dynamická viskozita          | $\eta = 8,723 \text{ [kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{]}$        |
| Kinematická viskozita        | $\nu = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2\text{.s}^{-1}\text{]}$ |
| Součinitel tepelné vodivosti | $\lambda_v = 0,530 \text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$   |
| Prandtlovo číslo             | $\text{Pr} = 1,08 \text{ [-]}$                                |

### **Výpočet středního teplotního logaritmického rozdílu**

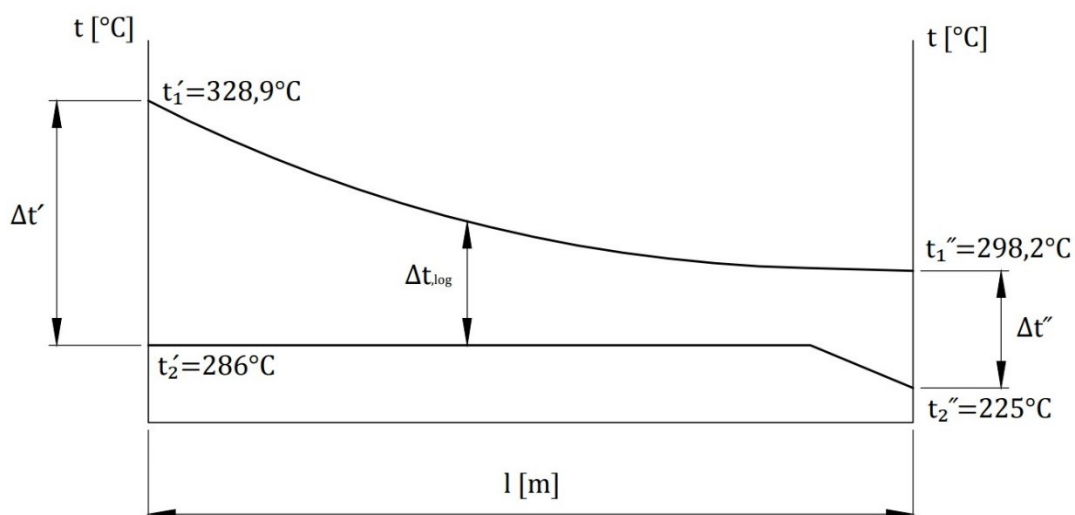
$t_1'$  – teplota primárního média vstupujícího do výměníku

$t_1''$  – teplota primárního média vystupujícího z výměníku

$t_2'$  – teplota syté páry při zadaném výstupním tlaku 7MPa

$t_2''$  – teplota napájecí vody





Obr. č. 5.1: Průběh teplot výměníkem [vlastní zpracování]

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 328,9 - 286 = 42,9 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 289,2 - 225 = 73,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{\log} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

$$\Delta t_{\log} = \frac{42,9 - 73,2}{\ln \frac{42,9}{73,2}} = 56,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Výpočet hmotnostního průtoku výměníkem, průtočné plochy a počtu trubek výměníku

Za předpokladu, že je celkový průtok média reaktorem rozdělen rovnoměrně mezi čtyři smyčky primárního okruhu, pak hmotnostní průtok vody jedním výměníkem:

$$\dot{m}_v = \frac{\rho \cdot \dot{V}}{4 \cdot 3600} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

$$\dot{m}_v = \frac{682,6 \cdot 86 \cdot 10^3}{4 \cdot 3600} = 4076,6 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Pro následující výpočty je třeba charakterizovat parametry teplosměnných trubek.

Ze zdroje [16], kde je výměník popsán, jsou pro výpočet převzaty rozměry trubek

$D = 16 \times 1,5 \text{ mm}$ . Z popisu plyne, že vnitřní průměr těchto trubek odpovídá  $d = 13 \text{ mm}$ .

Průměrnou rychlost proudění primárního média trubkami je třeba zvolit.

Zvolená průměrná rychlost proudění média trubkami má hodnotu  $5 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Výpočet celkové teoretické průtočné plochy výměníku:

$$S_{p,t} = \frac{\dot{m}_v}{\rho \cdot w} \text{ [m}^2] \quad (5)$$

$$S_{p,t} = \frac{4076,6}{682,6 \cdot 5} = 1,194 \text{ [m}^2]$$

Výpočet průtočné plochy pro jednu trubku:

$$S_{1tr} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ [m}^2] \quad (6)$$

$$S_{1tr} = \frac{3,14 \cdot 0,013^2}{4} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2]$$

Teoretický počet trubek ve výměníku:

$$n_{tr,t} = \frac{S_{p,t}}{S_{1tr}} \quad [-] \quad (7)$$

$$n_{tr,t} = \frac{1,194}{1,33 \cdot 10^{-4}} = 8977 \quad [-]$$

Vzhledem k předpokládanému vzniku netěsností u části trubek v průběhu životnosti výměníku, a nutnosti je pak zaslepit, je dobré počet trubek vhodně zvýšit.

Skutečný počet trubek ve výměníku po zvýšení o 10%:

$$n_{tr,sk} = n_{tr,t} \cdot 1,1 \quad [-] \quad (8)$$

$$n_{tr,sk} = 8977 \cdot 1,1 = 9875 \quad [-]$$

Výpočet skutečné průtočné plochy výměníku:

$$S_{p,sk} = S_{1tr} \cdot n_{tr,sk} \quad (9)$$

$$S_{p,sk} = 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot 9875 = 1,31 \quad [m^2]$$

Výpočet skutečné rychlosti proudění média trubkami:

$$w_{sk} = \frac{\dot{m}_v}{\rho \cdot S_{p,sk}} [m \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

$$w_{sk} = \frac{4076,6}{682,6 \cdot 1,31} = 4,56 [m \cdot s^{-1}]$$

### **Výpočet součinitele přestupu tepla mezi vodou primárního okruhu a vnitřním povrchem trubky**

Pro volbu vztahu vhodného pro výpočet součinitele přestupu  $\alpha_1$  je třeba určit Reynoldsovo číslo dle následujícího vztahu, kde za  $d_1$  je dosazován charakteristický rozměr, tedy vnitřní průměr trubky.

$$Re = \frac{w_{sk} \cdot d_1}{\nu} [-] \quad (11)$$

$$Re = \frac{4,56 \cdot 0,013}{1,28 \cdot 10^{-7}} = 463125 [-]$$

Z výsledku vyplývá, že proudění primárního média trubkou je turbulentní, jelikož  $Re > 10^4$ .

Pro výpočet součinitele přestupu tepla mezi primárním médiem a vnitřní stěnou trubky je dle literatury [13] zvolen následující vztah:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

kde:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{st}}\right)^{0,25} [-]$$

Určení Prandtlova čísla při střední teplotě stěny trubky:

Střední teplotu stěny lze přibližně určit jako aritmetický průměr střední teploty vody v primárním okruhu  $t_{v,st}$  a teploty syté páry  $t_2'$  v sekundárním okruhu při zadaném tlaku 7 MPa:

$$t_{s,st} = \frac{t_{v,st} + t_2'}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12)$$

$$t_{s,st} = \frac{316,6 + 286}{2} = 299,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Prandtlovo číslo při střední teplotě stěny dle termodynamických tabulek [14]:

$$Pr_{st} = 0,98 [-]$$

Nusseltovo číslo:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{st}}\right)^{0,25} [-] \quad (13)$$

$$Nu = 0,021 \cdot 463125^{0,8} \cdot 1,08^{0,43} \cdot \left(\frac{1,08}{0,98}\right)^{0,25} = 758 [-]$$

Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a stěnou trubky:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_1} \text{ [} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \text{]} \quad (14)$$

$$\alpha_1 = \frac{758 \cdot 0,530}{0,013} = 30903 \text{ [} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \text{]}$$

## Výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a parovodní směsí sekundárního okruhu

Pro výpočet je dle literatury [8] použitý vztah:

$$\alpha_2 = A \cdot q^n \quad [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Hodnota středního tepelného toku  $q$  je dosazována v  $[kW \cdot m^{-2}]$  a exponent  $n$  se volí dle charakteru trubky. Pro čistý a hladký teplosměnný povrch trubky byl zvolen exponent  $n = 0,7$ .

Výpočtová konstanta  $A$  je dle literatury [8] definována vztahem:

$$A = \frac{100}{3,3 - 0,0133 \cdot (t_2' - 100)} \cdot \frac{4,186}{3600} \quad [-]$$

Po dosazení teploty syté páry za  $t_2'$ : (15)

$$A = \frac{100}{3,3 - 0,0133 \cdot (286 - 100)} \cdot \frac{4,186}{3600} = 0,141 \quad [-]$$

Dále je třeba pro výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha_2$  nejprve odhadnout velikost středního tepelného toku  $q$  a následně ji iterační metodou zpřesnit tak, aby výsledný součinitel přestupu tepla  $\alpha_2$  po dosazení do vztahu (17) vygeneroval konstantu  $k$ , kdy po jejím vynásobení středním teplotním logaritmickým rozdílem  $\Delta t_{\log}$  ve vztahu (18) dostaneme přibližně stejnou hodnotu odhadovaného středního tepelného toku  $q$ .

Odhadovaný tepelný tok má hodnotu  $179 [kW \cdot m^{-2}]$ .

Výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha_2$  :

$$\alpha_2 = A \cdot q^n \quad [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

(16)

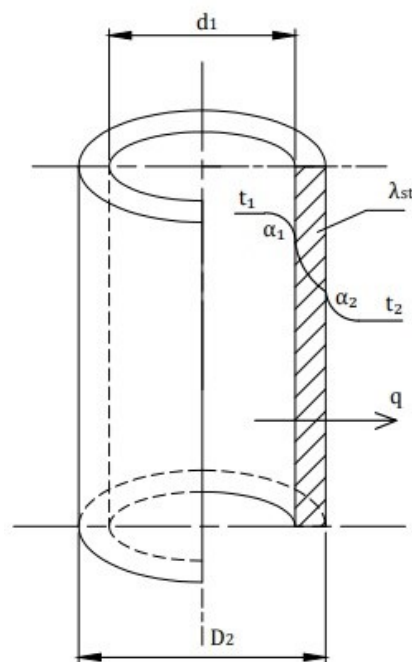
$$\alpha_2 = 0,141 \cdot 179^{0,7} = 5,324 \quad [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

### Výpočet součinitele prostupu tepla válcovou stěnou trubky

Vhodným materiálem na vlásenky výměníku byla zvolena chromniklová ocel dle EN 1.4541, jejíž součinitel tepelné vodivosti stěny odpovídá hodnotě:

$$\lambda_{st} = 18,69 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Tepelný tok  $q$  v tomto případě prochází směrem od vnitřní stěny ke stěně vnější. Výsledný součinitel prostupu tepla  $k$  je ovlivněn materiálem  $\lambda_{st}$ , dále pak šířkou stěny danou rozdílem průměrů  $D_2$ ,  $d_1$ , a také součiniteli přestupu tepla  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ . Teplo prochází do stěny a ze stěny konvekci, samotnou stěnou kondukcí, kdy průběh teplot ve válcové stěně má logaritmický charakter.



Obr. č. 5.2: Prostup tepla stěnou trubky [vlastní zpracování]



Výsledný součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{D_2}{d_1} + \frac{D_2}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln \frac{D_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

(17)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{30903} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,69} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{5324}} = 3159 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Zpětný kontrolní výpočet středního tepelného toku stěnou trubky:

$$q = k \cdot \Delta t_{\log} \quad [W \cdot m^{-2}]$$

(18)

$$q = 3159 \cdot 56,7 = 179115,3 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

Z rozdílu odhadované hodnoty tepelného toku  $q$  a hodnoty toku získané kontrolním výpočtem je zřejmé, že odhad byl správný. Hodnota odhadovaného a vypočteného tepelného toku se liší o méně než 0,1 %.

### Výpočet parního a tepelného výkonu výměníku

Z termodynamických tabulek [14] určíme následující tepelné charakteristiky vody a páry:

$$\text{entalpie napájecí vody při teplotě } t_2'' - i_{nv} = 966,9 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$\text{entalpie syté páry při teplotě } t_2' - i_{sp} = 2772 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$\text{entalpie syté kapaliny při teplotě } t_2' - i_{sk} = 1268,4 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet výparného tepla vody při teplotě  $t_2'$  :

$$i_{vyp} = i_{sp} - i_{sv} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19)$$

$$i_{vyp} = 2772 - 1268,4 = 1503,6 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Parní výkon výměníku:

$$G = \frac{Q}{i_{vyp} + 1,01 \cdot (i_{sk} - i_{nv})} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (20)$$

$$G = \frac{800 \cdot 10^3}{1503,6 + 1,01 \cdot (1268,4 - 966,9)} = 442,5 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] = 1593 \text{ [t} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Z výsledku je zřejmé, že vypočtená výsledná hodnota parního výkonu výměníku je správná, jelikož se od zadání liší o méně než 0,5 %.

Tepelný výkon výměníku:

$$Q = G \cdot (i_{sp} - i_{nv}) \text{ [kW]} \quad (21)$$

$$Q = 442,5 \cdot (2772 - 966,9) = 798757 \text{ [kW]}$$

Z výsledku je zřejmé, že vypočtená výsledná hodnota tepelného výkonu výměníku je správná, jelikož se od zadání liší o méně než 0,2 %.

## Výpočet velikosti teplosměnné plochy výměníku a střední délky trubky

Velikost teplosměnné plochy:

$$S = \frac{Q}{q} \text{ [m}^2\text{]} \quad (22)$$

$$S = \frac{800 \cdot 10^6}{179115,3} = 4466,4 \text{ [m}^2\text{]}$$

Celková délka trubek potřebných na výměník:

$$l = \frac{S}{\pi \cdot D_2} \text{ [m]} \quad (23)$$

$$l = \frac{4466,4}{\pi \cdot 0,016} = 88856 \text{ [m]}$$

Střední délka jedné trubky při uvažovaném počtu 9875 trubek:

$$l_{stř} = \frac{l}{n} \text{ [m]} \quad (24)$$

$$l_{stř} = \frac{88856}{9875} = 9,0 \text{ [m]}$$

## **Závěr**

### **Porovnání projektů APR-1400 a VVER-1200 v souvislosti s možnou dostavbou JE Temelín**

#### **APR-1400**

##### Silné stránky projektu:

- Existence spuštěných, do jisté míry referenčních bloků v Jižní Korei, a rozestavěných v dalších zemích. Před spuštěním je blok v SAE.
- Elektrický výkon 1400 MWe je ještě přijatelný pro dostavbu JE Temelín, pro dostavbu JE Dukovany by tento blok byl zřejmě příliš výkonný.
- Dosavadní výstavba bloků probíhala poměrně bezproblémově a nepotýkala se s výrazným zdržením. Bloky se v zemích mimo EU staví průměrně 5 let.
- Verze EU-APR je oproti APR-1400 vybavena dvojitým kontejnmentem, lapačem taveniny a větší redundancí bezpečnostních systémů.
- KHNP reaguje na požadavky evropského trhu také nabídkou bloku APR-1000 s výkonem 1000 MWe, který by byl na stejné bezpečnostní úrovni jako EU-APR.
- Z geopolitického hlediska by se jihokorejský dodavatel mohl jevit jako méně kontroverzní než jiní dodavatelé.

##### Slabé stránky projektu:

- Ve verzi, v jaké byly bloky doposud stavěny, nesplňují kritéria pro generaci III+. Plnohodnotně referenční blok EU-APR, splňující kritéria evropských jaderných dozorů, zatím postaven není.
- Elektrický výkon 1400 MWe se může jevit nevýhodným v případě dostavby JE Dukovany, kde je omezená chladicí kapacita. Výstavba dvou odlišných bloků, v případě současné dostavby JE Temelín a JE Dukovany, by mohla značně navýšit investiční náklady.
- Rozměry reaktorové nádoby, a zvláště parogenerátorů by mohly představovat komplikace při přepravě. Dopravitelnost těchto komponent, zejména do JE Dukovany, není ověřená.
- S výjimkou stavebních prací se zřejmě nedá počítat s výraznějším využitím potenciálu dodavatelských firem působících v ČR.

## VVER-1200

### Silné stránky projektu:

- Jsou v provozu a ve výstavbě referenční bloky, které zcela splňují evropské požadavky a spadají do generace III+, jsou standardně vybaveny dvojitým kontejnmentem a lapačem aktivní zóny.
- Ve světě je hodně rozestavěných bloků, což by se mělo z důvodu sériovosti příznivě projevit na investičních nákladech.
- Dosavadní výstavba nových bloků se nepotýká se zvlášť výrazným zdržením.
- VVER-1200 navazuje na prověřené, desetiletí v ČR provozované jaderné zdroje.
- Elektrický výkon jednoho bloku 1200MWe se jeví přijatelně jak pro případnou dostavbu JE Temelín, tak pro plánovanou dostavbu JE Dukovany.
- Případná stavba dvou totožných bloků současně by výrazně snížila investiční náklady.
- Dá se předpokládat využití potenciálu dodavatelských firem působících v ČR. Předpokládá se lokalizace až 70%. Lze využít zkušeností místních dodavatelských firem z oblasti jaderného strojírenství, jelikož se na výstavbě bloků VVER-1200 v okolních zemích podíleli a podílí.
- Vzhledem k tomu, že nejrozměrnější klíčové komponenty jako reaktorová nádoba a parogenerátory se rozměrově významně neliší od předchozí generace provozované v JE Temelín, lze dopravitelnost považovat za ověřenou.

### Slabé stránky projektu:

- Vzhledem k horizontálnímu situování parogenerátorů jsou kontejnmenty sice nižší, ale potřebná zástavbová plocha je větší.
- Stavba jednoho bloku v zemích mimo EU trvá průměrně 7 let.

## **Porovnání použitých bezpečnostních systémů v projektech APR-1400 a VVER-1200**

Největším nebezpečím, které hrozí při provozu jaderných elektráren, je únik štěpných produktů z aktivní zóny reaktoru a následně do životního prostředí. Takový únik by mohl nastat pouze v důsledku těžkých havárií spojených s tavením aktivní zóny, po překonání všech čtyř bezpečnostních bariér. Druhou z bariér, po krystalické struktuře jaderného paliva, je palivová tyč, která hermeticky uzavírá palivové tablety a brání úniku štěpných produktů do vody primárního okruhu. S ohledem na tepelný tok, procházející od středu palivové tablety přes mezeru vyplněnou héliem a pak materiálem palivové tyče, narážíme na skutečnost, že i u projektů tlakovodních reaktorů nové generace jsme limitováni teplotou povrchu palivové tyče kolem 350 °C. Již při těchto teplotách začíná zirkoniová slitina ztrácet své vlastnosti a hrozí ztráta hermetičnosti palivové tyče, i když teplota tavení uranových tablet přesahuje 2800 °C a samotných tyčí 1200 °C. Z těchto důvodů je zřejmé, že jedním z klíčových faktorů k bezpečnému provozování tlakovodních reaktorů je zabránění přehřátí aktivní zóny za všech okolností.

### Porovnání některých bezpečnostních systémů:

- U reaktorů APR-1400, EU-APR i VVER-1200 lze v případě těžkých havárií LOCA zabránit přehřátí automatickým pádem havarijních tyčí do aktivní zóny a okamžitou reakcí aktivních vysokotlakých havarijních systémů. Vysokotlakými čerpadly je do aktivní zóny vstřikována voda s kyselinou boritou, jež spolu s havarijními tyčemi absorbují neutrony a zastavují štěpení. Jakmile poklesne tlak v primárním okruhu pod příslušnou mez, je pasivním systémem do aktivní zóny dodáván z hydroakumulátorů roztok kyseliny borité. Cílem je udržet reaktor v podkritickém stavu a zaplavený chladící vodou. Po dalším poklesu tlaku v primárním okruhu, kdy už mohou být aktivována nízkotlaká havarijní čerpadla, je nízkotlakým havarijním systémem do reaktoru dopravován velký objem vody, který může zajistit dlouhodobější odvod zbytkového tepla z aktivní zóny.
- U APR-1400, EU-APR i VVER-1200 může být prostřednictvím pasivních systémů, založených na přirozené cirkulaci, aktivní zóna dochlazována tak, že je teplo odváděno přes parogenerátory buď do okolního vzduchu (VVER-1200 V-392M), nebo do vody v nádržích nad kontejnmentem (EU-APR a VVER-1200 V-491).
- U APR-1400, EU-APR i VVER-1200 jsou teplo a tlak páry, vzniklé v průběhu havárie uvnitř kontejnmentu, omezovány sprchovými systémy. Bloky VVER-1200 V-491 ale navíc disponují pasivním systémem odvodu tepla z obálky, který je taktéž

založen na principu přirozené cirkulace. Kondenzační teplo je tímto systémem odváděno opět do vody v nádržích nad kontejnmentem.

- APR-1400, EU-APR i VVER-1200 disponují systémem odstraňování vodíku z kontejnmentu.
- EU-APR i VVER-1200 jsou vybaveny lapačem taveniny aktivní zóny. Ve verzi APR-1400 má případnému průniku taveniny nádobou bránit zaplavení šachty reaktoru vodou.
- EU-APR i VVER-1200 jsou vybaveny dvojitým kontejnmentem.

Při porovnání projektů APR-1400 a VVER-1200 z hlediska možné dostavby se ukazuje, že výstavba bloku nebo bloků VVER-1200 v porovnání s bloky EU-APR by byla z mnoha hledisek přínosnější. Nejen s ohledem na české jaderné strojírenství, kdy by mohl být více využitý potenciál českých firem.

Porovnání základních bezpečnostních systémů bloků EU-APR (evropské verze APR-1400) a VVER-1200 V-491 naznačuje, že z hlediska nabízených bezpečnostních systémů na tom budou oba projekty srovnatelně. VVER-1200 V-491 ale navíc disponuje systémem pasivního odvodu tepla z obálky a vzhledem k většímu objemu vody v primárním okruhu se dá předpokládat větší tepelná setrvačnost, a tudíž i delší čas k řešení případných nehod.

V této bakalářské práci jsem se věnoval popisu a porovnání dvou z několika projektů, kterými by mohla být realizována dostavba jaderné elektrárny Temelín.

Nejdůležitějšími faktory pro případný výběr nejvhodnějšího projektu budou podrobné ekonomické analýzy a porovnání právního zabezpečení zkoumaných projektů, což nebylo cílem této práce.

Ve výpočtové části této bakalářské práce jsem provedl tepelný výpočet horizontálního trubkového výměníku tepla voda / pára ve čtyřsmýčkovém uspořádání prvního okruhu, dle zadaných parametrů.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc., za věcné a efektivní rady a připomínky, které byly velkým přínosem k úspěšnému dokončení této práce. Rád bych také poděkoval své manželce a rodině za jejich velkou podporu v průběhu studia.

## LITERATURA

- [1] KOLAT, PAVEL. Úvod do jaderné energetiky, KOLAT, PAVEL. Jaderné elektrárny III. + generace [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18\\_Zaklady-ekologie\\_48-49/48\\_IUT/111\\_Jaderna-energetika---Kolats---P3.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18_Zaklady-ekologie_48-49/48_IUT/111_Jaderna-energetika---Kolats---P3.pdf)
- [2] HISTORIE A SOUČASNOST ELEKTRÁRNY TEMELÍN-ČEZ; encyklopedie energetiky [online].[cit.2020-4-10] <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/historie-a-soucasnost>
- [3] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU-STÁTNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE ČESKÉ REPUBLIKY; Praha 2014 [online].[cit.2020-4-05] <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-2015.pdf>
- [4] BUDOUCNOST JADERNÉ ENERGETIKY A TECHNICKÉ VZDĚLÁNÍ V ČR- JADERNÉ DNY 2018; prezentováno J.Štullerem 4/2018 [online].[cit.2020-4-05] [https://www.jadernedny.cz/public/data/1\\_stuller.pdf](https://www.jadernedny.cz/public/data/1_stuller.pdf)
- [5] ПЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ВВЭР -г. Ханой [online].[cit.2020-4-15] <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/st-2013/documents/98.pdf>
- [6] ZÁKLADNÍ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ -VÝVOJOVÁ GENERACE TECHNOLOGIE JADERNÝCH REAKTORŮ- ČEZ, encyklopedie energetiky [online] .[cit.2020-4-12] <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [7] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU- NÁRODNÍ AKČNÍ PLÁN ROZVOJE JADERNÉ ENERGETIKY V ČESKÉ REPUBLICE; 5/2015 [online]. [cit.2020-4-15] <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54251/61936/640148/priloha001.pdf>
- [8] S.S. KUTATELADZE, V.M. BORISANSKIJ- Příručka sdílení tepla, SNTL Praha 1962
- [9] THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF VVER-1000 RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM USING RELAP5 CODE, AN EVALUATION AT THE BOUNDARY OF REACTOR REPAIR MODE; Z.Tabadar; 4/2017 [online].[cit.2020-4-16] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817301370>
- [10] TECHNOLOGIE A ZABEZPEČENÍ, ČEZ [online].[cit.2020-4-16] <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1>
- [11] PROJECT AES-2006; 2014; [online].[cit.2020-4-16] [http://atomenergoprom.ru/u/file/npp\\_2006\\_eng.pdf](http://atomenergoprom.ru/u/file/npp_2006_eng.pdf)

- [12] OENERGETICE - RUSKÝ REAKTOR GENERACE 3+ V ELEKTRÁRNĚ NOVORONĚŽ 2 ZAHÁJIL PILOTNÍ PROVOZ NA 90% VÝKONU, 8/2019 J. Puchar [online].[cit.2020-5-01]  
<https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/rusky-reaktor-generace-3-elektrarne-novovoronez-2-zahajil-pilotni-provoz-90-vykonu>
- [13] DVOŘÁK ZDENĚK-Výměníky tepla (pro hydraulické a pneumatické stroje); Praha 6, ČVUT 1992
- [14] K. RAŽNJEVIĆ – Termodynamické tabulky; Bratislava, Alfa 1984
- [15] TECHNICKÝ TÝDENÍK-PROJEKTOVANÁ ŽIVOTNOST REAKTORU VVE R-1200 JE 60 LET; 1/2014 [online].[cit.2020-4-16]  
[https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/projektovana-zivotnost-reaktoru-vve-r-1200-je-60-let\\_24044.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/projektovana-zivotnost-reaktoru-vve-r-1200-je-60-let_24044.html)
- [16] KEY FEATURES of MIR.1200 (AES-2006) design and current stage of Leningrad NPP-2 construction – SAINT-PETERSBURG INSTITUTE “ATOMENERGOPROEKT “(JSC SPAEP) [online].[cit.2020-4-16]  
<https://www.slideshare.net/myatom/key-features-of-mir1200-aes2006-design-and-current-stage-of-leningrad-npp2-construction>
- [17] ATOM INFO – APR-1400 PARAMETRY, HISTORIE A SPECIFIKACE; 5/2018 [online].[cit.2020-4-18]  
<http://atominfo.cz/2018/05/apr-1400-parametry-historie-specifikace/>
- [18] KEPKO E&C – REALIZING CUSTOMER VALUES WITH THE BEST TECHNOLOGY – APR 1400 [online].[cit.2020-4-10]  
<https://www.kepco-enc.com/eng/contents.do?key=1533>
- [19] BULLETIN 3/2012 – ČESKÉ JADERNÉ FÓRUM; MIR 1200-PROJEKT PRO TEMELÍN 3,4; ISSN 1213-4554 [online].[cit.2020-4-11]  
[http://www.nuclear-forum.cz/PDF/BULLETIN\\_CJF\\_2012\\_03.pdf](http://www.nuclear-forum.cz/PDF/BULLETIN_CJF_2012_03.pdf)
- [20] PROJEKT MIR.1200 A AKTUÁLNÍ POŽADAVKY NA BEZPEČNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN; Ing. Jan Zdebor, CSc [online prezentace]. [cit.2020-4-11]  
<https://docplayer.cz/413456-Projekt-mir-1200-a-aktualni-pozadavky-na-bezpecnost-jadernych-elektaren.html>
- [21] ČTK, EKONOMIKA – V RUSKU SPUSTILI PRVNÍ JADERNÝ REAKTOR NOVÉ GENERACE NA SVĚTĚ, JE BEZPEČNĚJŠÍ A EFEKTIVNĚJŠÍ; 8/2016 [online].[cit.2020-4-09]  
<https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/v-rusku-spustili-prvni-jaderny-reaktor-nove-generace-iii/r~8050a2b45d6511e6b597002590604f2e/>
- [22] ATOM INFO-ZAOSTŘENO NA PROJEKT MIR 1200; 11/2013 [online].[cit.2020-4-19]  
<https://atominfo.cz/2013/11/zaostreno-na-projekt-mir-1200/>

- [23] TECHNICKÝ TÝDENÍK – EVOLUCE RUSKÝCH TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ; 1/2006 Ing. F. Hezoučský [online].[cit.2020-4-20]  
[https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/evoluce-ruskych-tlakovodnich-reaktoru\\_18139.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/evoluce-ruskych-tlakovodnich-reaktoru_18139.html)
- [24] УСОБЕРШЕНСТВОВАННАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА ВВЭР-1000 (В-392У) для энергоблоков №3 и 4 Хмельницкой АЭС; 6/2011 [online].[cit.2020-4-20]  
<https://www.slideshare.net/AtomNews/3x4>
- [25] NUCLEOPEDIA WWER-1200; 1/2020 [online].[cit.2020-4-21]  
<https://de.nucleopedia.org/wiki/WWER-1200>
- [26] ROSATOM- The VVER today [online].[cit.2020-4-25]  
<https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf>
- [27] KOREAN NUCLEAR INDUSTRY-APR 1400; [online].[cit.2020-5-02]  
<https://www.yumpu.com/en/document/read/27711463/imagination-apr1400>
- [28] APR+ (ADVANCET POWER REACTOR PLUS); 6/2013 [online].[cit.2020-5-02]  
<https://aris.iaea.org/PDF/APR.pdf>
- [29] GEN III/ GEN III+: KOREAN PERSPECTIVE APR 1400;katalog [online].[cit.2020-5-03]  
<https://www.yumpu.com/en/document/view/10604885/design-characteristics-of-apr1400-opr1000-iaea>
- [30] APR 1400 (ADVANCET POWER REACTOR 1400 MWe); 11/2011 [online].[cit.2020-5-03]  
<https://aris.iaea.org/PDF/APR1400.pdf>
- [31] SLABINY UCHAZEČŮ O VÝSTAVBU NOVÝCH REAKTORŮ V ČR; ISBN:978-80-906270-8-6; Prof. Stephen Thomas (UK) [online].[cit.2020-5-01]  
[https://cz.boell.org/sites/default/files/slabiny\\_reaktoru\\_o\\_vystavbu\\_novych\\_reaktoru\\_steve\\_thomas.pdf](https://cz.boell.org/sites/default/files/slabiny_reaktoru_o_vystavbu_novych_reaktoru_steve_thomas.pdf)
- [32] APR 1400- DESIGN CONTROL DOCUMENT TIER 2; 12/2014 [online].[cit.2020-4-30]  
<https://www.nrc.gov/docs/ML1500/ML15006A040.pdf>
- [33] APR 1400- SYSTEM DESIGN (NUCLEAR STEAM SUPPLY SYSTEM); 4/2016 [online].[cit.2020-4-29]  
<https://www.nrc.gov/docs/ML1609/ML16097A030.pdf>
- [34] FENNOVOIMA – TURBINE ISLAND 2017; [online].[cit.2020-4-30]  
[https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/23449/fennovoima\\_huynh.pdf](https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/23449/fennovoima_huynh.pdf)
- [35] APR 1400 PWR INTRODUCTION; Ismail Hamza; [online].[cit.2020-5-05]  
<https://www.slideshare.net/IsmailHamza1/apr-1400-presentation>

- [36] KOREA NUCLEAR POWER PLANTS AND TECHNOLOGY; 10/2017 KEPKO  
Byung Jin LEE, Ph.D. [online].[cit.2020-5-01]  
<http://www.nuclearaustralia.org.au/wp-content/uploads/2017/10/ANA2017-Lee.pdf>
- [37] ADVANCED POWER REACTOR IN KOREA; 5/2017 [online].[cit.2020-5-04]  
[https://www.energeticketrebitsko.cz/data\\_4/soubory/6.pdf](https://www.energeticketrebitsko.cz/data_4/soubory/6.pdf)
- [38] ŠKODA JS a.s.; 2018 NUCLEAR DAYS: THREE RIVALS MEET 4/2018  
[online].[cit.2020-4-29]  
<https://www.skoda-js.cz/en/2018-nuclear-days-three-rivals-meet/>
- [39] APR 1000 (ADVANCED POWER REACTOR 1000); 11/2011  
[online].[cit.2020-4-29]  
<https://aris.iaea.org/PDF/APR1000.pdf>
- [40] GE POWER- ARABELLE STEAM TURBINES FOR NUCLEAR POWER  
PLANTS [online].[cit.2020-4-27]  
<https://www.ge.com/power/steam/steam-turbines/nuclear-arabelle>
- [41] REFERENČNÍ PROJEKTY; ČEZ [online].[cit.2020-4-15]  
<https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderne-zdroje/proc-nova-jaderna-elektrarna/technologie>
- [42] MDEP TECHNICAL REPORT TR-APR 1400-1; 4/2018 [online].[cit.2020-5-08]  
<https://www.oecd-neo.org/mdep/documents/TR-APR1400-01%20Design%20Description%20and%20Comparison%20of%20Design%20Differences.pdf>
- [43] ROSATOM; FUNDAMENTALS of AES-2006 TECHNOLOGY; VVER  
(AES-2006)  
SAFETY SYSTEMS; Denis Podoliakin; 6/2017[online].[cit.2020-5-09]  
<https://ppt-online.org/270519>
- [44] ROSATOM; SAFETY of NEW RUSSIAN VVER DESIGNS WITH AN  
ACCOUNT of THE LESSONS, LEARNED FROM FUKUSHIMA. DAIICHI  
ACCIDENT AND NEW IAEA REQUIREMENTS; Sergey Boyarkin; Bratislava  
2/2013 [online].[cit.2020-5-09]  
<https://www.slideserve.com/gada/rosatom>

## Seznam obrázků

- Obr. č. 2.1: a) JE Temelín před plánovanou dostavbou  
b) Vizualizace možné dostavby JE Temelín
- Obr. č. 2.2: Části primárního okruhu JE Temelín
- Obr. č. 2.3: Zjednodušené schéma jaderné elektrárny Temelín s rektorem VVER-1000
- Obr. č. 2.4: Schéma bezpečnostních systémů v JE Temelín
- Obr. č. 3.1: Pasivní systém PAFS a pasivní systém lokalizace a stabilizace taveniny aktivní zóny určené pro nové bloky EU-APR a APR-1000
- Obr. č. 3.2: Schéma primárního okruhu
- Obr. č. 3.3: Reaktor APR- 1400
- Obr. č. 3.4: Hlavní cirkulační čerpadlo bloku APR-1400
- Obr. č. 3.5: Schéma parogenerátoru
- Obr. č. 3.6: Kompenzátor objemu a přetlakový systém v JE Shin-Kori 5 a 6 blok
- Obr. č. 3.7: Schéma bezpečnostních systémů bloku APR-1400
- Obr. č. 3.8: Schéma systému
- Obr. č. 3.9: Schéma systému AFWS
- Obr. č. 3.10: Schéma zaplavení šachty pod reaktorem
- Obr. č. 3.11: Schéma bezpečnostních systémů projektu APR+
- Obr. č. 3.12: Schéma sekundárního přetlakového systému
- Obr. č. 4.1: Primární okruh VVER-1200
- Obr. č. 4.2: Sestava jaderného reaktoru VVER-1200
- Obr. č. 4.3: Umístění reaktoru VVER-1200 v šachtě
- Obr. č. 4.4: Hlavní cirkulační čerpadlo GCNA-1391
- Obr. č. 4.5: Parogenerátor PGV-1000MKP
- Obr. č. 4.6: Kompenzátor objemu s příslušenstvím
- Obr. č. 4.7: Vysoko-středotlaký díl turbíny ARABELLE -1000 zdroj
- Obr. č. 4.8: Porovnání konfigurací turbín zdroj
- Obr. č. 4.9: Schéma primární částí bloku VVER-1200 a bezpečnostních systémů
- Obr. č. 4.10: Dvoukanálová modifikace havarijního vstřikování
- Obr. č. 4.11: Čtyřkanálová modifikace havarijního vstřikování
- Obr. č. 4.12: Vysokotlaké zaplavení AZ
- Obr. č. 4.13: Nízkotlaké zaplavení AZ
- Obr. č. 4.14: Havarijní vstřikování bóru
- Obr. č. 4.15: Dodávka havarijní napájecí vody

Obr. č. 4.16: Nouzový odvod plynů  
Obr. č. 4.17: Systém pasivního odvodu tepla SPOT  
Obr. č. 4.18: SPOT-PG a SPOT-ZO  
Obr. č. 4.19: lapač taveniny aktivní zóny  
Obr. č. 4.20: Autokatalytické rekombinátory  
Obr. č. 5.1: Průběh teplot výměníkem (vlastní zpracování)  
Obr. č. 5.2: Prostup tepla stěnou trubky (vlastní zpracování)

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1.1: Potenciální dodavatelé bloků generace III+  
Tabulka 2.1: Základní technické parametry jaderné elektrárny Temelín  
Tabulka 3.1: Charakteristiky energobloku APR-1400  
Tabulka 3.2: Parametry hlavního cirkulačního čerpadla bloku APR-1400  
Tabulka 3.3: Parogenerátor bloku APR-1400  
Tabulka 4.1: Základní technické charakteristiky energobloku VVER-1200(AES-2006)  
Tabulka 4.2: Porovnání reaktorů VVER  
Tabulka 4.3: Parametry parogenerátorů